

Universidad Nacional Experimental
de los Llanos Occidentales
"EZEQUIEL ZAMORA"



LA UNIVERSIDAD QUE SIEMBRA

VICERRECTORADO
DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
ESTADO PORTUGUESA

**PROPUESTA PARA MODELACION Y USO
DE PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL SUELO
A PARTIR DE TEXTURA,
MATERIA ORGÁNICA Y EL MODELO *SPAW***

Autor: José Gabriel Vargas G.

Tutor: Franco Antonucci

Guanare, diciembre de 2022

**Universidad Nacional Experimental
de los Llanos Occidentales
“EZEQUIEL ZAMORA”**



LA UNIVERSIDAD QUE SIEMBRA

**VICE-RECTORADO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
PROGRAMAS DEL AGRO Y DEL MAR
SUBPROGRAMA INGENIERÍA AGRÓNOMICA
SUBPROYECTO APLICACIÓN DE CONOCIMIENTOS II**

PROPUESTA PARA MODELACION Y USO DE PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL SUELO A PARTIR DE TEXTURA, MATERIA ORGÁNICA Y EL MODELO *SPAW*

Requisito parcial para optar al grado de Ing. Agrónomo

Autor: José Gabriel Vargas González

Tutor: Prof. Franco Antonucci

Guanare, diciembre de 2022



DE LOS LLANOS OCCIDENTALES

"EZEQUIEL ZAMORA"

ACTA DE VEREDICTO

El 14 de Diciembre de 2022 en las instalaciones del Vicerrectorado de Producción Agrícola de la Universidad Nacional Experimental De Los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora" ubicada en el municipio Guanare, se reunió el jurado integrado por los profesores: WAGNER GALANDEZ CI:

9.405810
Jose Cuervo CI: 9.251.966 y el tutor
Franco Antonacci CI: 11837073 para evaluar el trabajo de

Aplicación de Conocimientos II
titulado PROPUESTA PARA MODELACIÓN Y USO DE LAS PROPIEDADES
HIDRAULICAS DEL SUELO A PARTIR DE TEXTURA CONTENIDO DE MATERIA
ORGANICA Y EL MODELO SPAW como requisito parcial para optar por el grado
académico de Ingeniero Agrónomo, de los bachiller(es) JOSE GABRIEL VARGAS CI:
13520870 y CI: se otorga APROBAR el trabajo discutido

en su forma y contenido, dando la calificación de ().

Dando fe y en constancia de lo aquí señalado firman:

Prof. Franco Antonacci

CI: 11837073

Tutor

Prof. Wagner Galandez

CI: 9405810

Jurado Principal Interno

Prof. Carmen Gimenez-M

CI.16.475.391

Coordinadora del Subproyecto de Aplicación de Conocimientos II



Prof. Jose Cuervo

CI: 9.251.966

Jurado Principal Interno

Prof. Hender Pérez

CI. 17396263

jefe de Subprograma de Agronomía

AGRADECIMIENTO

A mi familia: Dulce Milagros González (madre) y José Carlos Vargas Rivero (padre) por ser autores de mi existencia y por enseñarme a perseverar para alcanzar las metas propuestas, siempre bajo los buenos principios de ética y honestidad... Lo que soy, se lo debo a Ustedes.

Nelys Maribel Escobar (esposa) y Dulce Gabriela Vargas E. (hija), por creer en mí y apoyarme incondicionalmente en tiempos de extremas dificultades... Las amo.

A la UNELLEZ: Por permitirme emprender este nuevo camino en mi crecimiento profesional y por aportar las herramientas necesarias para alcanzarlo... ¡Mi *Alma Mater!*.

A Agroinversiones Orión: Porque a través de su gerencia, abrió sus puertas empresariales para coadyuvar con el proceso de formación y crecimiento, no sólo desde el punto de vista profesional, sino también en el ámbito personal, social y cultural... ¡La unión nos dará la fuerza!.

A los autores de los diferentes estudios, monografías, publicaciones y otros que en este trabajo se incluyen para conocimientos de otros y que sin ellos no hubiese sido posible este sueño... ¡Sus aportes nos hacen crecer!.

A todos mis colaboradores: Ingenieros, administradores, caporales, maquinistas, mecánicos, obreros, cocineras, transportistas, entre otros, porque en conjunto, conformaron el bastión más importante en ésta experiencia: el contacto directo con el recurso humano... ¡Esencia del saber y el hacer en campo!.

El autor

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL DE LOS LLANOS
OCCIDENTALES “EZEQUIEL ZAMORA”
VICERRECTORADO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
PROGRAMA CIENCIAS DEL AGRO Y DEL MAR
SUB PROGRAMA INGENIERIA AGRONOMICA

PROPUESTA PARA MODELACION Y USO DE PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL SUELO A PARTIR DE TEXTURA, MATERIA ORGÁNICA Y EL MODELO SPAW

Autor: José Gabriel Vargas González

Tutor: Prof. Franco Antonucci

Año: 2022

RESUMEN

La cuantificación del flujo de agua y el transporte de productos químicos en la zona vadosa generalmente requiere el conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo no saturado. De tal manera, que las relaciones del potencial hídrico del suelo y la conductividad hidráulica (K) con el contenido de agua del suelo son necesarias para muchas investigaciones relacionadas con el manejo del mismo, como la conservación del agua, la programación del riego, el drenaje, la migración de solutos, así como el crecimiento y el estrés hídrico de las plantas, por lo que estas investigaciones comúnmente requieren del conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo. En el presente trabajo se planteó el aprovechamiento de las propiedades físicas del suelo, como textura y materia orgánica, para modelar las variables hidráulicas del suelo a través del modelo SPAW. Se obtuvieron los valores simulados que componen el potencial hídrico del suelo, así como los valores de conductividad hidráulica saturada. Se planteó su utilización en la gestión hídrica de los suelos y para el manejo de los cultivos. Se concluye que la modelación de procesos de las relaciones suelo-agua-planta en la gestión del recurso hídrico del suelo y manejo de cultivos mediante modelos informáticos, es un procedimiento o método general válido para resolver problemas relacionados con estos, al representar en la actualidad una oportunidad para el análisis de procesos, por lo que la presente propuesta exhibe una marcada viabilidad técnica y operativa para la modelación y uso de las variables hidráulicas del suelo.

Palabras clave: agua en el suelo, programas determinísticos, simulación de procesos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ACTA DE APROBACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ECUACIONES	ix
LISTA DE ABREVIACIONES	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.- FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
I.1.- Formulación del problema.....	4
I.2.- Justificación.....	6
I.3.- Objetivos	8
CAPÍTULO II.- DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	9
II.1.- La modelación como proceso o método de investigación	9
II.2.- Relaciones de la textura y la <i>MO</i> con las propiedades hidráulicas del suelo	10
II.3.- Fundamentos para el cálculo de las propiedades hidráulicas del suelo	12
II.4.- Propiedades hidráulicas del suelo.....	13
II.4.1.- Capacidad de retención de agua en el suelo	13
II.5.- Descripción del modelo <i>SPAW</i> versión 6.02.75.....	15
II.5.1.- Restricciones de uso del programa	16
II.6.- Utilidad agronómica de las propiedades hidráulicas del suelo.....	16
II.6.1.- Balance hídrico edáfico y demanda de agua por los cultivos	16
II.6.2.- Indicadores de la labranza basados en la textura y el contenido de <i>MO</i>	19
II.6.3.- Programación del riego.....	21
II.6.4.- Mejoras en las propiedades hidráulicas del suelo con la adición de <i>MO</i>	23
II.7.- Bases Legales	24
CAPÍTULO III.- MATERIALES Y MÉTODOS	26

III.1.- Aspectos generales de la investigación.....	26
III.2.- Descripción de los métodos y sus componentes esenciales.....	26
III.3.- Fase 1.- Información básica y complementaria requerida	26
III.3.1.- Información básica requerida	26
III.3.1.1.-Métodos para la obtención de la información edafoclimática	26
III.3.2.- Información complementaria.....	29
III.4.- Fase 2.- Modelación de las Pro Hid del suelo.....	30
III.5.- Fase 3.- Utilidad agronómica de las Pro Hid del suelo.....	30
III.6.- Caracterización de la propuesta	32
III.6.1.-Niveles metodológicos de la investigación.....	32
III.6.2.-Tipo de estudio	32
III.6.3.-Población y muestra.....	33
III.7.- Resultados esperados	33
III.8.- Cronograma de actividades.....	34
CAPÍTULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
IV.1.- Información requerida; Fase 1	35
IV.1.1.-Información edáfica	35
IV.1.2.-Información climática.....	36
IV.1.3.-Información diversa	38
IV.1.4.-Información complementaria.....	38
IV.2.- Modelación de las propiedades hidráulicas del suelo; Fase 2.....	40
IV.3.- Uso de las propiedades hidráulicas del suelo; Fase 3	44
IV.3.1.-Cuantificación del balance hídrico edáfico y demanda de agua del sistema	44
IV.3.2.-Indicadores de la labranza basados en la textura y el contenido de MO	46
IV.3.3.-Programación del riego.....	49
IV.3.4.-Inferencia sobre mejoras en las propiedades hidráulicas del suelo por adición de MO	51
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	59
ANEXOS	63
Anexo A.- Histórico de precipitaciones; provisto por Agroinversiones Orión	63

Anexo B.- Datos climáticos;localidad Guanare, Venezuela. (base de datos <i>ClimWat 2.0</i>)	64
Anexo C.- Propiedades físicas de los suelos (<i>Lab-UNELLEZ</i>).....	64
Anexo D.- Requerimiento hídrico del cultivo; lote Ayacucho.....	65
Anexo E.- Requerimiento hídrico del cultivo; lote Junin.....	66
Anexo F.- Requerimiento hídrico del cultivo; lote Zulia	67
II.6.1.- Predicción de la compactación del suelo	¡Error! Marcador no definido.
IV.3.1.-Predicción de la compactación del suelo	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Métodos de estimación de los parámetros físicos del suelo.....	27
Tabla 2.- Parámetros necesarios para correr el modelo <i>CropWat 8.0</i>	28
Tabla 3.- Valores promedios por lotes de las propiedades físicas (<i>Lab-UNELLEZ</i>)	35
Tabla 4.- Clasificación de suelos salinos	36
Tabla 5.- Información básica requerida por el modelo <i>CW8</i>	38
Tabla 6.- Propiedades hidráulicas de los suelos por muestra; modelo <i>SPAW</i>	40
Tabla 7.- Valores promedios de las propiedades hidráulicas de los suelos; modelo <i>SPAW</i>	41
Tabla 8.- Requerimiento hídrico total y costos totales por concepto de riego	45
Tabla 9.- Déficit de precipitación o requerimientos de riego.....	45
Tabla 10.- Valores calculados por clase textural para LSL e IT	47
Tabla 11.- Calendario de riego para el lote Ayacucho; modelo <i>CropWat</i>	49
Tabla 12.- Calendario de riego para el lote Junin; modelo <i>CropWat</i>	50
Tabla 13.- Calendario de riego para el lote Zulia; modelo <i>CropWat</i>	50
Tabla 14.- Edad del cultivo y periodos inter-riego por lotes.....	51
Tabla 15.- Variación del contenido de MO y propiedades hidráulicas; lote Ayacucho	52
Tabla 16.- Variación del contenido de MO y propiedades hidráulicas del suelo; lote Junin	53
Tabla 17.- Variación del contenido de MO y propiedades hidráulicas del suelo; lote Zulia	53
Tabla 18.- Incremento (%) en las propiedades hidráulicas por unidad de incremento de MO	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Triangulo textural de suelo de la USDA-SCS (tomado de Feike et all. 1986)	11
Figura 2.- Esquema conceptual del balance hídrico (tomado de Degioanni <i>et all</i> , 2006).....	18
Figura 3.- Lotes muestreados y número de muestras	27
Figura 4.- Distribución promedio de la precipitación anual.....	37
Figura 5.- Ubicación relativa del área de estudio.....	39
Figura 6.- Balance hídrico edáfico y el déficit de precipitación.....	44
Figura 7.- Valores promedio CC, PMP, LSL y %/CC por clase textural.....	48
Figura 8.- Incremento esperado de la K_0	55

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.- Ecuación de balance hídrico.....	17
Ecuación 2.- Lamina faltante programada	18
Ecuación 3.- Contenido de humedad del suelo a un potencial dado	20
Ecuación 4.- Limite superior de laborabilidad del suelo.....	20
Ecuación 5.- Modelo para estimar el Límite Superior de Laborabilidad del suelo.....	31
Ecuación 6.- Variación porcentual de la propiedad hidráulica analizada	31

LISTA DE ABREVIACIONES

Término	Abreviación
Contenido volumétrico de agua	θ
Potencial hídrico	ψ_h
Conductividad hidráulica	k
Propiedades hidráulicas	Pro hid
Materia orgánica	MO
Densidad aparente	Da
Conductividad hidráulica saturada	K_0
Departamento de Agricultura de los Estados Unidos	USDA
Conductividad eléctrica	Ce
Potencial de presión	ψ
Servicio de Conservación de Suelos	SSC
Capacidad de Campo	CC
Sortividad	S_0
Punto de Marchitez Permanente	PMP
Contenido volumétrico de humedad a CC	θ_{CC}
Contenido volumétrico de humedad en el PMP	θ_{PMP}
Intervalo de Agua más Limitante	IAML
Capacidad de Retención de Agua	CRA
Contenido de humedad a saturación	θ_s
Programa de simulación de los sistemas Suelo-Planta-Aire-Agua	SPAW
Límite superior de laborabilidad del suelo	LSL
Laboratorio de edafología de la UNELLEZ	Lab-UNELLEZ
Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología	INAMEH
Índice de trabajabilidad	IT
Saturación	Sat
Agua disponible	AD
Variación	Δ
Coefficiente de determinación	R^2
Franco arcilloso	FA
Franco arcillo limoso	FAL
Franco	F
Arcillo limoso	AL
Franco limoso	FL
Límite inferior para la labranza	LIL
Periodos inter riego	PIR
Potencial osmótico	Ψ_0

INTRODUCCIÓN

La cuantificación del flujo de agua y el transporte de productos químicos en la zona vadosa generalmente requiere el conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo no saturado. En éste sentido, Saxton *et al.* (1986) mencionaron que las relaciones del potencial hídrico (ψ_h) del suelo y la conductividad hidráulica (K) con el contenido volumétrico de agua (θ) del suelo son necesarias para muchas investigaciones relacionadas con el manejo del mismo, como la conservación del agua, la programación del riego, el drenaje, la migración de solutos, así como el crecimiento y el estrés hídrico de las plantas, por lo que estas investigaciones comúnmente requieren del conocimiento de las propiedades hidráulicas (*Pro Hid*) del suelo. De tal manera, que el conocimiento de los mecanismos de movimiento del agua en los horizontes superficiales del suelo ocupa un lugar preponderante en muchas áreas de investigación, como son la ingeniería civil, la hidrología, las ciencias ambientales y la agronomía (Filgueira *et al.*, 2006).

Por otra parte, Saxton *et al.* (1986) y Saxton y Rawls (2006) argumentaron que las mediciones de campo o de laboratorio son difíciles, costosas y a menudo poco prácticas para muchos análisis hidrológicos. A éste respecto, Saxton *et al.* (1986) afirmaron que para muchos propósitos, como la valoración de la curva de humedad característica completa, las estimaciones generales basadas en información más fácilmente disponible, como la textura del suelo, serían suficientes. Por su parte, Saxton y Rawls (2006) aseguraron que para definir los efectos hidrológicos del agua del suelo, es necesario estimar las características del agua en el mismo para el ψ_h y la K , utilizando variables del suelo como la textura, la materia orgánica (MO) y la estructura, por lo que las correlaciones estadísticas entre éstas variables, pueden proporcionar estimaciones suficientemente precisas para muchos análisis y decisiones.

De acuerdo con Saxton *et al.* (1986), estudios previos han desarrollado correlaciones estadísticas entre la textura del suelo y los potenciales de suelo seleccionados utilizando una gran base de datos, y también entre texturas de suelo seleccionadas y K , que concluyeron en la proporción de ecuaciones matemáticas para estimaciones continuas en amplios rangos de

textura, potenciales hídricos y K , que si bien, solo representaron una estimación estadística y la influencia de la textura, éstas proporcionaron resultados bastante útiles para muchos casos habituales de suelo y agua, mientras que Filgueira *et al.* (2006) aseguraron que se pueden obtener valores representativos del campo sin los problemas aparejados de la toma y transporte de muestras. De tal manera, que Saxton *et al.* (1986) enfatizaron sobre el beneficio de contar con un método computacionalmente eficiente para estimar las características del agua del suelo con una precisión razonable a partir de entradas fácilmente disponibles, pero consientes que para ser computacionalmente eficiente y preciso, se necesitan ecuaciones.

A tales efectos, Saxton *et al.* (1986) demostraron que la textura determina predominantemente las características de retención de agua de la mayoría de los suelos agrícolas, y señalaron que la misma puede estar disponible o puede estimarse mediante métodos simples (Bouyoucos, 1951), por lo que podría servir fácilmente como la principal variable de entrada para un método matemático de estimación de las relaciones características del suelo y el agua. De tal modo, que las ecuaciones de Saxton *et al.* (1986) brindaron una excelente eficiencia computacional para aplicaciones de modelos, y las texturas pueden ser usadas como parámetros de calibración donde se encuentren disponibles datos característicos del agua del suelo en el campo o en el laboratorio, por lo tanto concluyeron, que siendo éstas ecuaciones válidas para una amplia gama de texturas, resultarían computacionalmente eficientes para permitir un uso fácil con una computadora digital para proporcionar estimaciones razonablemente precisas de los potenciales no saturados y las K con un mínimo de datos fácilmente disponibles.

Posteriormente y con otro enfoque del problema, Rawls *et al.* (1998) citados por Filgueira *et al.* (2006) usaron datos de textura, densidad aparente (D_a) y la pendiente de la curva de retención hídrica para predecir conductividad hidráulica saturada (K_0). Mientras que por su parte, Saxton y Rawls (2006) desarrollaron nuevas ecuaciones características del agua del suelo a partir de la base de datos de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) disponibles para la fecha, utilizando solo las variables fácilmente disponibles de textura del suelo y MO, y aunque estas ecuaciones son similares a las reportadas previamente por Saxton *et al.* (1986), las mismas incluyen más variables y

rangos de aplicación, al combinarlas con las relaciones previamente informadas para las tensiones y conductividades y los efectos de la *Da*, la grava y la salinidad para formar un sistema predictivo integral de las características del agua del suelo para la gestión del agua agrícola y los análisis hidrológicos.

De tal manera, que Saxton y Rawls (2006) programaron un sistema predictivo para un modelo computarizado gráfico con el fin de proporcionar una aplicación fácil y soluciones rápidas en el cálculo de las *Pro Hid* del suelo (disponible en <http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>), al actualizar las ecuaciones de Saxton *et al.* (1986) para tensión de agua del suelo, con nuevas ecuaciones derivadas de una gran base de datos de suelos del *USDA*, usando solo variables comúnmente disponibles como textura del suelo y MO, incorporar la ecuación de conductividad mejorada de Rawls *et al.* (1998), y combinarlos con los efectos de la *Da*, la grava y la salinidad para proporcionar un sistema predictivo ampliamente aplicable. Así, la aplicación de este conocimiento es imprescindible para la simulación hidrológica dentro de paisajes naturales (Saxton y Rawls, 2006). Por lo tanto, el objetivo de éste trabajo fue proponer una metodología que integre la modelación y el uso de las *Pro Hid* del suelo a partir de datos de textura, MO y el modelo *SPAW*.

CAPITULO I.- FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.1.- Formulación del problema

Saxton *et all.* (1986) aseguraron que las relaciones entre el ψ_h y la K varían ampliamente y no linealmente con el θ para diferentes texturas, por lo cual éstas resultan relativamente difíciles y costosas de medir o no son factibles para investigaciones a corto plazo o remotas. Por otra parte, la investigación de la ciencia del suelo ha desarrollado una amplia comprensión del agua del mismo y su variabilidad con las características de éste (Van Genuchten *et all.* (1992) citado por Saxton y Rawls (2006).

Así mismo, Saxton y Rawls (2006) mencionaron la carencia de capacidad o tiempo para realizar determinaciones de campo o de laboratorio que a menudo limitan a los hidrólogos, de tal modo que los valores requeridos suelen ser determinados a partir de mapas locales de suelo o estimaciones publicadas de retención de agua y K_0 , pero advirtieron que estos métodos generalmente no brindan suficiente rango o precisión para los análisis hidrológicos computarizados.

A este respecto, Filgueira *et all.* (2006) destacaron la importancia de disponer de una metodología confiable y rápida para estimar las P_{ro} Hid del suelo, mientras que Dexter *et all.* (2005) y Pérez y Florentino (2014) aseguraron que en ausencia de datos de retención de agua del suelo, estas características pueden estimarse a partir de datos básicos del suelo usando funciones de pedotransferencia, no obstante, los valores medidos siempre serán más precisos que los valores estimados. En este sentido, podemos formular las siguientes interrogantes:

- *¿Se cuenta con una metodología práctica y viable para estimar los valores de las P_{ro} Hid del suelo a partir de datos de fácil obtención como la textura y el contenido de MO?*

- *¿Qué utilidad pueden tener las variables calculadas de hidráulica del suelo en la gestión hídrica de los cultivos?*

De tal manera, que en el siguiente trabajo se propone el aprovechamiento de las virtudes de modelos computarizados en la modelación de las Pro Hid del suelo a partir de la textura y el contenido de MO para su posterior uso en la gestión hídrica de los cultivos.

I.2.- Justificación

La evaluación de las *Pro Hid* del suelo es importante para el entendimiento de la dinámica de los procesos de movimiento de agua y de solutos en el mismo. La habilidad de los suelos para retener y transmitir agua está determinada por sus *Pro Hid* (Pla (1995) citado por Copa (2014)). Por otra parte, Andrade *et al.* (2014) señalaron que para el cultivo de caña de azúcar, tradicionalmentese requieren análisis de suelo periódicos por parte de los productores para llevar a cavo planes de fertilización. Adicional a esto, los análisis de suelo suelen incluir parámetros de rutina como textura (granulometría), contenido de MO y conductividad eléctrica (*Ce*), mismos que suelen ser subutilizados por desconocimiento de su aplicabilidad en el cálculo de las *Pro Hid* del suelo.

De acuerdo con Zavala *et al.* (2018), la ecuación base para el estudio mecanicista de los procesos de transferencia de agua, en la zona no saturada del suelo, se establece combinando el principio general de conservación de la masa y la ley de Darcy-Buckingham, de tal modo, que representaron las *Pro Hid* del suelo con el θ expresado como función del potencial de presión (ψ ; curva de retención de humedad) y la K , como función de θ o ψ (curva de K), al considerarlo necesario para aplicar una ecuación de transferencia, y asegurar que la capacidad predictiva de los modelos mecanicistas de las *Pro Hid* de los suelos no saturados, debe conocerse a detalle antes de desarrollar simulaciones de procesos de transferencia de agua en la zona vadosa del suelo.

Así mismo, Lozano *et al.* (2005) señalaron la disponibilidad actual de tres métodos indirectos para determinar las características hidráulicas del suelo; el modelo de la distribución del tamaño de poros, los métodos inversos y las funciones de pedotransferencia, y que éstas últimas se basan en que las *Pro Hid* están en función de la textura del suelo y de otras características disponibles como la distribución del tamaño de partículas, D_a y/o contenido de MO. Por su parte, Zavala *et al.* (2018) especificaron modelos analíticos que describen las *Pro Hid* del suelo, mismos que varían conceptualmente y en sofisticación, agrupados en a) modelos que abarcan funciones de pedotransferencia, establecidos sin considerar explícitamente las bases físicas del movimiento del agua en el suelo, y b) modelos

mecanicistas basados en las leyes de Poiseuille y Laplace, que permiten representar detalladamente los mecanismos fundamentales del proceso a partir de leyes físicas. En éste sentido, los modelos mecanicistas para la predicción de las *Pro Hid* del suelo, están disponibles en programas computacionales, que simulan el flujo del agua en suelos parcialmente saturados y la capacidad descriptiva de grupos de modelos para las *Pro Hid* (Zavala *et al.*, 2018).

Por otra parte, García *et al.* (2012) destacaron la importancia de las propiedades físicas del suelo en la evaluación de la calidad de este recurso, al argumentar la dificultad que presentan para mejorarlas. Así mismo, aseguraron que la calidad física del suelo está asociada al uso eficiente del agua, pero aunque no puede ser medida directamente, puede ser inferida a través de los indicadores de la calidad (estáticos o dinámicos) y de la medición de los atributos que están influenciados por el uso y las prácticas de manejo, tales como; la capacidad de almacenamiento del agua y la K_0 , propuestas como indicadores de la calidad física del suelo (García *et al.*, 2012).

De tal modo, que la elaboración del presente trabajo ofrece una oportunidad que induce a la generación de líneas de investigación pertinentes en procura de mejorar la gestión hídrica de los suelos y los cultivos, tales como: indicadores de la calidad física del suelo, mitigación de la falta de información climática local, validación del uso del modelo *SPAW* en condiciones locales, requerimientos de agua de los cultivos y de los sistemas, costo monetario del agua de riego, indicadores de la labranza basados en el contenido de humedad del suelo, planificación del calendario de riego, determinación de coeficientes de cultivo locales, entre otros.

I.3.- Objetivos

Objetivo General

Proponer una metodología que integre la modelación y el uso de las Pro Hid del suelo a partir de datos de textura, *MO* y el modelo *SPAW*.

Objetivos Específicos

- Procurar la información básica y complementaria, requeridas para la modelación y uso de las Pro Hid del suelo a partir de datos de textura, *MO* y el modelo *SPAW*.
- Ejemplificar la modelación de las Pro Hid del suelo a partir de datos reales de textura, *MO* y el modelo *SPAW*.
- Proponer formas de utilidad agronómica de las Pro Hid del suelo, calculadas a partir de datos de textura, *MO* y el modelo *SPAW*, en la gestión hídrica y manejo de los cultivos.

CAPÍTULO II.- DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

II.1.- La modelación como proceso o método de investigación

Morles (2002) señaló que el antecedente de la simulación por computadoras lo constituye el experimento mental, con vigencia actual y futura, ya que este comprende el hecho de imaginar lo que sucederá en un escenario si se cambiaran u ocurriesen ciertos hechos internamente o en su entorno. Este método ha sido utilizado por los grandes teóricos en muchas áreas, incluyendo la física (con Einstein), la astronomía, la sociología o política y la ingeniería, entre otros. Además, muchas técnicas especializadas están basadas o utilizan este método o el de la simulación; por ejemplo, la técnica *Delphi*, la técnica de los escenarios, la prospectiva y la investigación de operaciones.

No obstante, cuando se comenzaba a trabajar con modelos computacionales, un consejo común era: “No confiar en ningún modelo hasta que este haya sido validado usando datos independientes”. Sin embargo, en la actualidad y con algunos de los modelos determinísticos mas comunes ya probados y comprobados en su credibilidad, la expresión ha cambiado hacia; “No confiar en ninguna serie de datos hasta que esta haya sido validada usando un modelo” (Allen *et al.*, 1998). Ahora bien, González (2016) demostró que la modelación es una competencia a partir del análisis de variadas definiciones actuales de las cuales se asume una estructura compuesta por conocimientos, habilidades, valores y procesos de autorregulación del aprendizaje. Así, la modelación de procesos de informatización es una de las actividades más importantes en la actividad ingenieril, debido a la necesidad de una representación anticipada de los procesos de informatización por realizar.

La simulación integra el grupo de los cinco grandes procedimientos, métodos generales o vías para resolver problemas intelectuales, que puede usarse aisladamente o en combinación con la intuición, el ensayo-error, la razón y la experiencia, y que contempla su valor, su oportunidad, sus ventajas y sus desventajas. Así, la simulación se perfila como un método innovador de reciente aparición, que permite la creación de realidades virtuales (modelos de la

realidad), mediante sistemas computarizados u otros artefactos, con el propósito de manipularlas a voluntad para observar su comportamiento o efectos, ya que mediante este procedimiento se pueden realizar estudios prospectivos al observar las respuestas de variables reinventadas (Morles, 2002).

II.2.- Relaciones de la textura y la *MO* con las propiedades hidráulicas del suelo

Matus y Maire (2000) aseguraron que la acumulación de *MO* depende del aporte de material orgánico y de la textura del suelo hasta que un equilibrio es alcanzado, cuando la tasa de incorporación iguala a la tasa de mineralización, momento en el cual, ésta última, no dependería de la textura del suelo ni del contenido de *MO*. Por su parte, Julca *et al.* (2006) denominaron indistintamente *MO* o humus a la parte orgánica del suelo, que tiene efecto sobre sus propiedades físicas, al formar agregados y dar estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas para formar el complejo de cambio, que favorece la penetración del agua y su retención, disminuye la erosión y favorece el intercambio gaseoso.

La textura del suelo fue definida por Bravo (2000) como la proporción en que se encuentran las fracciones de tamaño disperso de los diámetros de las partículas primarias del suelo, y señalada por Feike *et al.*, (1986) en categorías precisadas por el sistema de clasificación del Servicio de Conservación de Suelos (SSC) y del *USDA*, como arena (con un tamaño de entre 50 y 2000 μm), limo (con un tamaño de entre 2 - 50 μm) y arcilla (con un tamaño menor de 2 μm), según se muestra en la figura 1. Dexter *et al.* (2005) aseguraron que en la mayoría de los casos, el contenido de arcilla, el contenido de *MO* y la *Da* no son variables independientes y están fuertemente armonizados, al mencionar la correlación inversa entre el contenido de *MO* y el volumen de densidad. Por su parte, Saxton y Rawls (2006) aseguraron que la textura y la *MO* son variables primarias que afectan el θ del suelo.

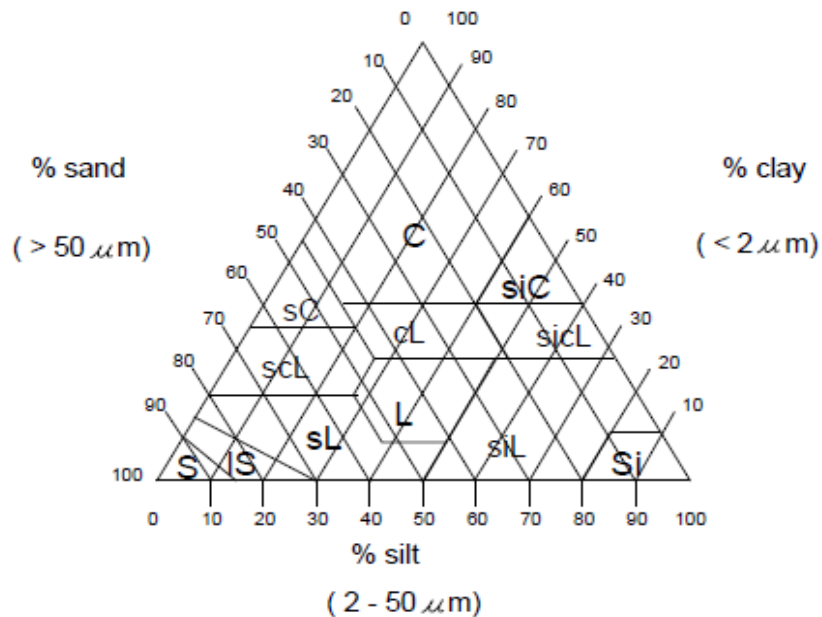


Figura 1.- Triángulo textural de suelo de la USDA-SCS (tomado de Feike et all. 1986)

S = Sand (Arena), IS = loamy Sand (Areno francoso), sL = sandy Loam (Franco arenoso), sC = sandy clay Loam (Franco arcillo arenoso), Si = Silt (limo), SiL = silt Loam (Franco limoso), cL = clay Loam (Franco arcilloso), L = Loam (Franco), siC = silt clay Loam (Franco arcillo limoso), sC = sandy Clay (Arcillo arenoso), siC = silt Clay (Arcillo limoso), C = Clay (Arcilla)

Cosby *et all.* (1984) demostraron claramente que la textura del suelo está relacionada con las características hidráulicas cuando aplicaron análisis de regresión y discriminación a dos grupos de datos. Posteriormente, Saxton *et all.* (1986), aseguraron que la textura es el factor dominante en la relación entre el ψ_y y el θ en el suelo, siendo el contenido de arcilla el factor más importante.

Por otra parte, Arrieché *et all.* (2014) aseguraron que la *MO* es un componente importante de la calidad del suelo, al destacar la importancia de su cuantificación, ya que ésta contribuye de manera reconocida a la productividad de los suelos en la agricultura tradicional, por ser la base de su fertilidad. En éste sentido Sanchez *et all.* (2005) señalaron que la *MO* del suelo es una mezcla heterogénea de residuos de plantas y animales en varios estados de descomposición, de sustancias sintetizadas microbiológicamente y/o químicamente a partir de los productos de degradación, de los cuerpos de microorganismos vivos y muertos, pequeños animales y sus restos en descomposición. Así, la *MO* del suelo tiene la propiedad de formar agregados y dar estabilidad estructural al mismo, al unirse a las arcillas y formar el complejo

de cambio, lo que favorece la penetración del agua al igual que su retención, disminuye la erosión y favorece el intercambio gaseoso, con lo cual se confiere un efecto muy marcado sobre las propiedades físicas del suelo (Julca *et al.*, 2006).

II.3.- Fundamentos para el cálculo de las propiedades hidráulicas del suelo

Saxton *et al.* (1986) advirtieron que el ψ_h en el suelo y la relación de la K con el θ en el mismo, son necesarios para muchos estudios de las relaciones planta-suelo-agua, pero que la medición de estas relaciones es costosa, difícil y a menudo poco práctica. Así, por ejemplo la Capacidad de Campo (CC) se determina mejor en el campo, saturando el suelo y midiendo su contenido de agua después de 48 horas de drenaje. El suelo a CC se siente muy húmedo en contacto con las manos (Shaxson y Barber, 2005).

Los cambios temporales en las propiedades del suelo constituyen indicadores de su funcionamiento y del manejo a que es sometido. Sin embargo, debe considerarse que, si bien, las propiedades físicas e hidráulicas del suelo pueden ser mejor comprendidas si se estudian de manera independiente, es bien sabido que entre ellas existe una estrecha interrelación y dependencia, que hace que de la interpretación de alguna se pueda inferir el comportamiento de otras (García *et al.*, 2012). De tal manera, que los análisis hidrológicos se logran comúnmente mediante la simulación por computadora de procesos individuales que luego se combinan en resultados más completos, para ser analizados mediante estadísticas o series de tiempo (Saxton y Rawls, 2006). Si bien los métodos modernos no ignoran los datos disponibles, la simulación de los procesos individuales, la recombinación en el paisaje y las respuestas de las cuencas a menudo revelan detalles adicionales más allá de los previamente disponibles, particularmente cuando los datos son limitados o son de difícil acceso.

A este respecto, por ejemplo Cerana *et al.* (2005) señalaron las grandes dificultades para obtener valores confiables de K_0 en suelos *Vertisoles*, expansivos y que se agrietan al secarse. Mientras que Filgueira *et al.* (2006) enfatizaron sobre el trabajo realizado en los últimos 15 años para encontrar un método rápido, sencillo y preciso que permitiera estimar dos Pro Hid

del suelo; la K_0 (mm h^{-1}) y la sortividad (S_0) ($\text{mm h}^{-1/2}$), de tal manera que parametrizaron una ecuación que permite, a partir de la porosidad efectiva, predecir la K_0 , de manera que no fuera necesario el trabajo experimental para estimar este parámetro.

Too *et al.* (2014) señalaron los estudios de la capacidad descriptiva de grupos de modelos para las *Pro Hid*. Sin embargo, la justificación de los modelos en el contexto de la teoría de la infiltración se ha considerado limitadamente, ya que la mayoría de los análisis evalúa sólo su flexibilidad para describir datos experimentales de campo o laboratorio. Por otra parte, Diersch (2014) mencionó que los modelos mecanicistas para las *Pro Hid* están disponibles en programas de cómputo que simulan el flujo del agua en suelos parcialmente saturados.

No obstante, Zavala *et al.* (2018) reportaron la existencia en la literatura de modelos analíticos que describen las *Pro Hid* del suelo, clasificándolos como: *funciones de pedotransferencia* (establecidas sin considerar explícitamente las bases físicas del movimiento del agua en el suelo) y *modelos mecanicistas* basados en las leyes de Poiseuille y Laplace (que permiten representar detalladamente los mecanismos fundamentales del proceso a partir de leyes físicas). Así, evaluaron la capacidad descriptiva de los modelos fractales al comparar sus predicciones con datos experimentales.

II.4.- Propiedades hidráulicas del suelo

II.4.1.- Capacidad de retención de agua en el suelo

Shaxson y Barber (2005) definieron el θ a *CC* como la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. De acuerdo con esto, el drenaje ocurre por la transmisión del agua a través de los poros mayores de 0,05mm de diámetro; sin embargo, la *CC* puede corresponder a poros que varían entre 0,03 y 1mm de diámetro. Por su parte, el Punto de Marchitez Permanente (PMP) se refiere al contenido de agua de un suelo que ha perdido tal cantidad de agua a causa del cultivo, que el agua que aún permanece en el suelo no está disponible para el mismo. En esas condiciones, el cultivo está

permanentemente marchito y no puede revivir cuando se le coloca en un ambiente saturado de agua. Al contacto manual, el suelo se siente casi seco o muy ligeramente húmedo.

Por otra parte, Claro (1991) aseveró que el agua aprovechable o disponible para las plantas es calculada de forma clásica como la diferencia entre contenido volumétrico de humedad a $CC(\theta_{CC})$ y el contenido volumétrico de humedad en el PMP (θ_{PMP}). Por su parte, Pérez y Florentino (2013) se refirieron a este rango de humedad en el suelo como el Intervalo de Agua más Limitante (*IAML*), al coincidir en que el θ_{CC} a la porosidad de aireación igual a 10% (Θ_{pa}) representa su límite superior, mientras que el límite inferior es el θ_{PMP} o el contenido de humedad a una resistencia del suelo igual a 1500 kPa.

No obstante, Kay y Grant (1996) citados por Pérez y Florentino (2013) cuestionaron la utilidad de éste concepto al referir que la misma es fuertemente influenciada por la textura y carbono orgánico del suelo, pero no responde a incrementos de la *Da*, por lo tanto, podrían presentarse limitaciones al crecimiento de las plantas atribuidas a una pobre aireación y alta resistencia mecánica, aun cuando la humedad del suelo se encuentre dentro del *IAML*. De tal manera, que en su trabajo Pérez y Florentino (2013) concluyeron que la determinación clásica del agua aprovechable, no es muy confiable en suelos con cierto nivel de degradación de sus propiedades físicas.

Por otra parte, Copa (2014) aseguró que la Capacidad de Retención de Agua (CRA) por los suelos es una función de la textura, la *MO* y el contenido de sal del suelo expresado por la *Ce*. Finalmente, el contenido de humedad a saturación (θ_s) se entiende como el θ del suelo cuando prácticamente todos los espacios están llenos de agua. En los suelos bien drenados es un estado temporal ya que el exceso de agua drena de los poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazada por aire (Shaxson y Barber, 2005).

II.5.- Descripción del modelo SPAW versión 6.02.75

El programa de simulación de los sistemas Suelo-Planta-Aire-Agua (*SPAW*, por sus siglas en inglés) para campos agrícolas y cuencas hidrográficas, es un modelo de balance hidrológico diario para campos agrícolas y estanques (humedales, lagunas, estanques y embalses), concebido por Saxton *et al.* (2006) para la programación del riego y el cálculo del balance de nitrógeno del suelo, por lo que resulta útil para comprender y gestionar el agua en la agricultura, la producción de las plantas y la utilización de nutrientes. Así, el modelo *SPAW* para computadora estima los contenidos diarios y el movimiento del agua y nutrientes para los suelos de campos agrícolas, además de los balances diarios de agua para humedales agrícolas, estanques y embalses.

En concordancia con lo anterior, Saxton *et al.* (2006) señalaron que en el balance hídrico, el modelo *SPAW* estima simultáneamente los componentes de; a) la atmósfera, ya que proporciona lluvia, energía de secado y viento conductor, b) el dosel vegetal y un sistema de raíces a medida que se desarrolla a lo largo de la temporada de crecimiento, c) el perfil de suelo, d) el agua almacenada y transportada en el suelo, e) el agua de riego añadida al sistema, y f) los nutrientes aplicados, almacenados e infiltrados en el suelo. De tal manera, que el modelo *SPAW* es un programa de computadora que puede ayudar a enseñar y asesorar a los agricultores sobre la administración de los recursos agua y el balance de nutrientes en el suelo. Algunos usos comunes para el balance hidrológico en campos agrícolas y estanques, se mencionan a continuación:

- Evaluar el clima diario y el estado del agua del suelo en la producción de cultivos.
- Desarrollar el riego óptimo y planes de aplicación química.
- Evaluar el movimiento del agua y químicos a las aguas subterráneas.
- Evaluar la frecuencia y duración de las inundaciones de humedales.
- Diseñar estanques para el abastecimiento de agua, incluido el riego.
- Diseño de lagunas de almacenamiento.

II.5.1.- Restricciones de uso del programa

Los suelos con un contenido de *MO* mayor de 8%, fueron omitidos del conjunto de datos analizados por Saxton y Rawls (2006) por considerarlos como suelos orgánicos, cuyas características del agua no serían representativas de los suelos minerales típicos, de tal modo, que las ecuaciones que relacionan el efecto de la *MO*, como variable dependiente, con la capacidad de retención de agua y *K* de los suelos, no deben aplicarse más allá del 8% en peso de *MO*, ya que no se espera que estos ajustes se apliquen más allá del contenido de *MO* de los suelos agrícolas dominados por minerales típicos, clasificados generalmente como altamente orgánicos o turba.

Así mismo, Saxton y Rawls (2006) omitieron de la base de datos aquellas muestras con valores extremos de *Da* ($< 1,0$ y $> 1,8 \text{ Mg (m}^3\text{)}^{-1}$) y contenido de arcilla ($> 60\%$), debido a que las muestras fuera del rango pudieron haber sido el resultado de la labranza o la compactación, lo que las hace diferentes a los suelos naturales, para efectos de de la *Da*, y que los suelos con un contenido muy alto de arcilla a menudo tienen una estructura de poros y efectos mineralógicos diferentes a los que contienen porciones más altas de fracciones de arena o limo.

II.6.- Utilidad agronómica de las propiedades hidráulicas del suelo

II.6.1.- Balance hídrico edáfico y demanda de agua por los cultivos

El balance hídrico del suelo es la formulación matemática de la ley de la conservación de la materia, aplicada al agua en un sistema dado (Claro, 1991). El sistema puede ser de cualquier tamaño, por ejemplo: el volumen de suelo ocupado por una planta, una parcela cultivada, una cuenca hidrográfica, una región, un país, entre otros. El cálculo del balance hídrico tiene aplicaciones de trascendencia en diferentes áreas como la climatología, la edafología, la ingeniería y la agronomía (balance hídrico para riego, balance hídrico para drenaje o balance hídrico agrícola).

La cuantificación del balance hídrico del suelo permite el desarrollo de alternativas para el manejo agronómico del cultivo y para el establecimiento de criterios de diseño para el desarrollo de sistemas de riego y/o drenaje (Barrios y Florentino, 2008). A éste respecto, Villafañe (1998) señaló las implicaciones que conyeva la realización de un balance hídrico, al considerar las demandas de agua de los cultivos, los aportes de agua de las lluvias en el lugar y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, de tal manera, que en un suelo cultivado y sin aportes freáticos, se pueden conocer los requerimientos de riego y de drenaje, haciendo uso de la ecuación de balance, como sigue:

$$B = P + Lau_1 - ETc - Lau_2$$

Ecuación 1.- Ecuación de balance hídrico

Donde: B = balance resultante para el periodo considerado

P = precipitación durante el periodo considerado

Lau_1 = remanente de la precipitación almacenado en el periodo anterior (día, semana, mes, etc.)

ETc = evapotranspiración del cultivo en el período considerado

Lau_2 = remanente de la precipitación almacenado después de satisfacer la ETc del periodo considerado (día, semana, mes, etc.)

Villafañe (1998) advirtió que la Lau tiene un máximo, determinado por la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, la profundidad de exploración del sistema radical del cultivo y el nivel límite de agotamiento permisible; de manera que si B resulta positivo, significa que se produce un exceso en el periodo, que se pierde por percolación o escorrentía. Si particularmente Lau_2 es igual a cero y B resulta negativo, entonces existe un déficit que debe ser cubierto con el riego. No obstante, Villafañe (1998) aseguró que la ecuación de balance hídrico considera que la precipitación es efectiva mientras el suelo no alcance la CCy que la magnitud máxima de almacenamiento de agua en el suelo comprende el rango de humedad entre CC y contenido crítico, de tal manera, que la misma depende del cultivo y de la profundidad efectiva del suelo.

Así, para efectos del balance hídrico, puede considerarse como lamina máxima almacenable la calculada con la profundidad efectiva del suelo, es decir, la lámina faltante programada (ecuación 2, ver en Villafañe, 1998) y particularmente para la primera fase del cultivo, la mitad de esa magnitud. De tal manera, que la cuantificación del balance hídrico depende del conocimiento de las propiedades hidráulicas de los suelos (Barrios y Florentino, 2008).

$$L_{fa} = L_n * U_c$$

Ecuación 2.- Lamina faltante programada

Donde:

$$L_n = \frac{CC - PMP}{100} * D_a * R$$

Donde: L_n = Lamina neta (cm)

CC = Capacidad de campo (%)

PMP = Punto de marchitez permanente (%)

D_a = Densidad aparente ($Mg (m^3)^{-1}$)

R = Profundidad radical (cm)

U_c = Coeficiente de uso consuntivo (%)

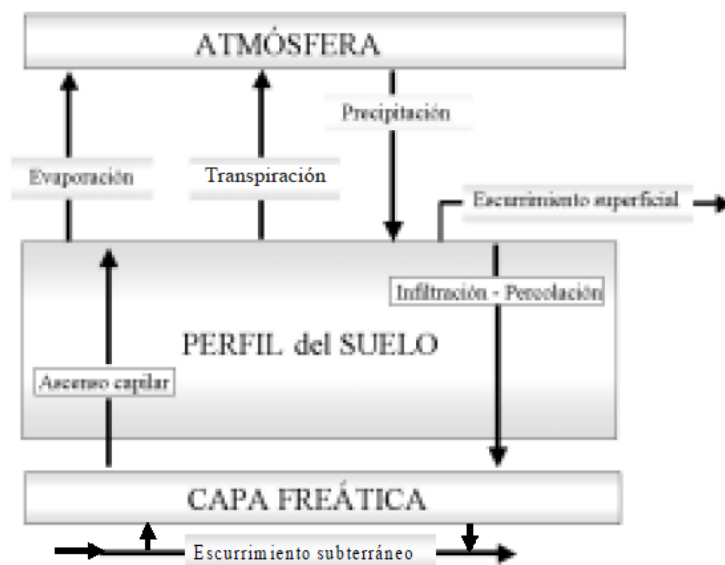


Figura 2.- Esquema conceptual del balance hídrico (tomado de Degioanni *et al*, 2006)

Por otra parte, Allen *et al.* (2006) citados por Peralta y Calle (2017) aseguraron que el aporte de agua y la consecuente disminución del agotamiento de la humedad en la zona radical, ocurre mediante la lluvia, el riego y el ascenso capilar del agua subterránea, mientras que los procesos de evaporación, transpiración del cultivo y las pérdidas por percolación remueven el agua de ésta zona, aumentando el agotamiento de la humedad del suelo (ver figura 2). A este respecto, Villafañe (1998) advirtió sobre la inclusión del componente freático en el balance hídrico, en caso de existir estos aportes, y su cuantificación requerirá el conocimiento de la dinámica de la mesa de agua del lugar, y de acuerdo con Degioanni *et al.* (2006), las oscilaciones de la capa freática tienen una elevada correlación con el balance hídrico local y su predicción, ya que en cortos períodos de tiempo, es un excelente indicador del riesgo de anegamiento y salinización de los suelos.

Finalmente, en ambientes con oscilaciones de la capa freática, el proceso de inundación por anegamiento es regulado principalmente por la evolución temporal de las componentes verticales del balance hídrico, donde la dinámica de la freática puede influir sobre el incremento del escurrimiento superficial, al saturar el perfil del suelo cuando se eleva hacia la superficie del mismo (Degioanni *et al.* 2006).

II.6.2.- Indicadores de la labranza basados en la textura y el contenido de MO

El suelo se encuentra en un estado laborable cuando se pueden realizar operaciones de labranza con resultados positivos, sin efectos que causen detrimento significativo en su estructura (Muller *et al.*, 2003 citados por Cadena *et al.*, 2010)). De tal manera, que la labranza del suelo en la agricultura presenta una marcada influencia sobre sus propiedades físicas, especialmente sobre las *Pro Hid* , por lo que su medición ha cobrado capital importancia en los temas de investigación en la física de suelos (Filgueira *et al.*, 2006).

No obstante, Cadena *et al.* (2010) advirtieron que la determinación de los límites adecuados de humedad para el laboreo del suelo, ya sea en campo o en el laboratorio, suele ser laboriosa, demandante de tiempo y con costos elevados, por lo que propusieron el uso de

algunas características del suelo en funciones matemáticas, que permitan predecir el mejor momento para la ejecución de la labranza, como una opción adecuada y barata. Bajo éstas premisas, Saxton *et al.*, 1986 hicieron una primera aproximación en el intento de predecir el contenido de agua del suelo para 12 potenciales de agua dados, mediante una ecuación de regresión lineal múltiple de la forma:

$$\theta_p = a (\% \text{ arena}) + b (\% \text{ limo}) + c (\% \text{ arcilla}) + d (\% \text{ MO}) + e (Da \text{ en Mg (m}^3\text{)}^{-1})$$

Ecuación 3.- Contenido de humedad del suelo a un potencial dado

Donde: “ θ_p ” es contenido de humedad del suelo a un potencial dado, “ Da ” es la densidad aparente, mientras que “ a ”, “ b ”, “ c ”, “ d ” y “ e ” son coeficientes de regresión.

Por otra parte, Cadena *et al.* (2010) desarrollaron un modelo estadístico, mediante el análisis de regresión múltiple, para relacionar el máximo contenido de humedad, el cual denominaron “límite superior de laborabilidad del suelo” (*LSL*), con la proporción de sus componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla y el componente orgánico como la concentración de *MO*, características estas que son más comunemente encontradas en las bases de datos de suelo, al considerar que son las variables que mejor predicen el *LSL*, a través de la relación:

$$LSL = (1,5446 \times MO) + (0,4243 \times Ar) + (0,2387 \times Li)$$

Ecuación 4.- Límite superior de laborabilidad del suelo

Donde: *LSL* = límite superior de laborabilidad, en porcentaje de humedad gravimétrica

MO = contenido de materia orgánica (%)

Ar y *Li* = contenidos de arcilla y limo, respectivamente (%)

Cadena *et al.* (2010) no consideran el contenido de arena como variable importante en la predicción del *LSL*, debido a que los suelos arenosos normalmente no presentan problemas para laborarse, es decir, casi a cualquier humedad pueden manipularse sin riesgos de

compactación o mala calidad de labor. Por otra parte, con un error de predicción, definido como el valor esperado de la diferencia entre una respuesta futura (y_0) y su predicción (\hat{y}_0), elevada al cuadrado, igual a 3,35, un coeficiente de determinación (R^2) de 0,996 derivado del ajuste de la regresión, el cual indica que el modelo explica el 99% de la variabilidad total y que la parte estructural del modelo es adecuada, y finalmente, la aplicación de la técnica de validación cruzada (Efron y Tibshirani, 1993 citados por Cadena *et al.*, 2010), con $K = 2$, el modelo ajustado resultó ser estable (Cadena *et al.*, 2010).

Así mismo, encontraron que la *MO* presenta un mayor efecto sobre la respuesta al *LSL*, ya que su concentración tiene influencia en la estructuración del suelo, la porosidad y la retención de humedad, que son determinantes para el *LSL*, mientras que por su parte, la arcilla impacta casi el doble que el limo en la respuesta del *LSL*. Finalmente, Pérez y Florentino (2014) concluyeron que las funciones de pedotransferencia para estimar contenidos de agua en el suelo en función de las propiedades de fácil medición (textura y *MO*), surgen como una herramienta interesante en la predicción de la trabajabilidad de suelos, y así orientar su manejo sostenible, al constatar que éstas expresaron la relación entre los parámetros de la curva ajustada de humedad y el tamaño de partículas, *Da* y *MO* del suelo para la estimación de la trabajabilidad y el Límite Húmedo para la Labranza del suelo.

II.6.3.- Programación del riego

El manejo del riego requiere de un saber hidráulico y agronómico, desde la evaluación y la captación del recurso, hasta su repartición en las parcelas con dosis y frecuencias adecuadas a los requerimientos de los cultivos (Copa, 2014). Así, para el diseño y ejecución de un proyecto de riego es necesario conocer una serie de parámetros que expresan la calidad del suelo en su estado natural. Entre las más importantes propiedades que se pueden medir y que son útiles para determinar la aptitud de la tierra para la producción agrícola bajo riego son: textura, estructura, densidades, porosidad, consistencia, profundidad radical efectiva, retención de humedad, infiltración, *K*, entre otros.

A este respecto, Barrios y Florentino (2008) aseveraron que el manejo eficiente de la nutrición hídrica para la producción, requiere de un control estricto del contenido de humedad en el suelo en función de la demanda del cultivo, lo cual depende de los factores ambientales y de la capacidad del suelo para suministrar agua desde el área insaturada, a fin de garantizar la fluctuación del contenido de humedad en el suelo dentro de un rango aceptable de valores, debido a que un valor demasiado bajo no permitirá que las demandas de la planta sean cubiertas por el ascenso capilar, mientras que un valor demasiado alto excluirá el aire del área radical.

De tal manera, que la planeación de la operación de sistemas de riego consiste en la formulación de programas o planes de riego y presenta diferentes fases a saber: a) la estimación de volúmenes de agua que se esperan en la fuente de captación; b) estimación de un plan de cultivos; y c) las demandas de riego del sistema. Para tener una buena administración del recurso agua se requiere hacer una adecuada planeación, considerando los elementos atmosféricos y basándose en ellos, determinar los requerimientos de agua de cada cultivo y realizar el calendario de riego para la zona de riego (Arteaga *et all.*, 2011). En este sentido, Villafañe (1998) aseveró que la programación del riego se refiere a la determinación de la lámina de riego, el tiempo de riego, los intervalos de riego y las posibles fechas de estos, así como la consideración de las etapas críticas de los cultivos, para precisar cuáles riegos son decisivos en la producción y cuales cultivos pueden brindar mejor respuesta en momentos de limitaciones de agua en la unidad de producción.

Para éste propósito, los modelos de simulación se utilizan en diversas ramas de la actividad humana, y en la planificación de áreas agrícolas han permitido un gran avance sobre todo en la agilidad de los cálculos, en el procesamiento de la información, en la simulación de diferentes procesos, con lo cual se conocen mejor éstos y en la obtención de resultados confiables por lo cual es importante contar con programas de cómputo que auxilien a los profesionales en la administración y el manejo del agua de riego (Arteaga *et all.*, 2011). Así, una alternativa que se está presentando en la gestión de los recursos hídricos, es la utilización de computadoras personales y modelos de simulación (programas de cómputo), para la realización del calendario de los planes de riego; en la actualidad los expertos en riego de la

FAO recomiendan el programa *CropWat*, como un instrumento práctico de ayuda a los profesionales relacionados con el manejo del agua, ya que éste auxilia en el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos, a partir de información del clima y los cultivos.

II.6.4.- Mejoras en las propiedades hidráulicas del suelo con la adición de MO

El carbono en la *MO* del suelo representa el 80% de las reservas terrestres y es considerado como un importante sumidero potencial de carbono para mitigar el efecto invernadero (Lozano *et al.*, 2015). No obstante, la *MO* también tiene efectos importantes sobre las propiedades físicas del suelo, al formar agregados y dar estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas para formar el complejo de cambio, disminuir la erosión y favorecer el intercambio gaseoso, además de influir sobre las *Pro Hid* al favorecer la penetración del agua y su retención (Julca *et al.*, 2006). De tal manera, la conservación y el almacenamiento del carbono orgánico del suelo es importante para mejorar las propiedades del mismo, sostener la productividad de los cultivos y mantener la calidad ambiental. No obstante, prácticas como la deforestación y la labranza durante la incorporación de un suelo a cultivos intensivos, además de otros factores climáticos y pedogénicos, promueven una disminución de casi un 50% del contenido de *MO* del suelo.

De acuerdo con Julca *et al.* (2006), la *MO* representa del 95 al 99% del total del peso seco de los seres vivos, pero su presencia en los suelos suele ser escasa y son contadas las excepciones en las que supera el 2%. A este respecto, Saxton *et al.* (1986) aseguraron que la *MO* ostenta un rango muy pequeño (0-3%) para la mayoría de los suelos agrícolas. Por lo tanto, el mantenimiento de la *MO* del suelo es importante para mejorar la productividad a largo plazo de los agroecosistemas. La aplicación al suelo de enmiendas orgánicas es una estrategia de manejo para contrarrestar la pérdida progresiva de la *MO* del Suelo bajo uso intensivo. La adición de enmiendas orgánicas puede mejorar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo y así influir positivamente en los parámetros de productividad de las plantas (Lozano *et al.*, 2015).

El contenido de *MO* puede ser aumentado con la incorporación de abonos orgánicos, a esto se le atribuyen beneficios importantes como la promoción de la salud de las plantas, y así obtener rendimientos equivalentes o incluso mayores en la producción orgánica con respecto a los obtenidos con el manejo convencional del suelo. Del mismo modo, las enmiendas orgánicas también pueden mejorar la agregación del suelo, la reducción de la *Da*, la estabilización del pH, un aumento de la capacidad de intercambio catiónico y una mayor capacidad de retención de agua (Lozano *et al.*, 2015).

II.7.- Bases Legales

El presente trabajo está sustentado en el Artículo 305 de la *Constitución de la República Bolivariana de Venezuela*(1999), en el cual se establece la política nacional de *seguridad alimentaria*.

En la ley del *Plan de la Patria*(2013) se contempla en su objetivo nacional 1.4, la ampliación de la superficie agrícola bajo riego y la transferencia tecnológica e inversiones para el saneamiento de suelos con estructura de drenaje y riego, entre otros, como mecanismos de ampliación de la frontera agrícola y la consolidación del desarrollo rural en áreas con gran potencial agrícola e hídrico, con el propósito de lograr la soberanía alimentaria que garantice el sagrado derecho a la alimentación del pueblo venezolano.

Así mismo, en los artículos 10 y 11 (numeral 2) de la Ley de Aguas (2007), se establece la conservación y el aprovechamiento sustentable de las aguas, así como los criterios para garantizar la disponibilidad en cantidad, respectivamente.

Por otra parte, en el Artículo 3 de la Ley de Meteorología e Hidrología Nacional (2006) queda establecido el carácter de interés general y uso público de la información básica meteorológica e hidrológica, y su consideración como patrimonio de la República Bolivariana de Venezuela. Así mismo, en el Artículo 24 *ejusdem*, se establece el carácter oficial, de toda publicación de la información básica meteorológica e hidrológica por parte del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH).

Finalmente, el presente trabajo está contemplado dentro de las líneas de creación intelectual para el periodo 2020-2025 de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora”, como **“Seguridad y soberanía alimentaria”** y **“Agricultura sustentable”**, fundamentados en los objetivos de desarrollo sustentable y objetivos del milenio de la UNESCO, y como **“Sustrato y estudio de suelo”** y **“Agua, manejo de recursos hídricos y sistemas de riego”**, fundamentados por su parte, en la Fundación para la Unificación Técnica, la Investigación, Capacitación y Extensión (UTICE).

CAPÍTULO III.- MATERIALES Y MÉTODOS

III.1.- Aspectos generales de la investigación

La presente investigación está enmarcada como componente del proyecto titulado; “Estado actual de los sistemas de drenaje superficial y su impacto sobre la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en la finca Orión, municipio Papelón, estado Portuguesa”, avalado por el grupo de Creación Intelectual “*Cartografía y Topografía*” perteneciente al Centro de Creación Intelectual “*Centro Cartográfico*” del Instituto de Biodiversidad, Conservación y Gestión de Recursos Ambientales “*Oswaldo Barbera*”, en respuesta a la iniciativa promovida desde la cátedra de “*Drenaje y Riego*” de la carrera Ingeniería Agronómica del Vicerrectorado de Producción Agrícola de la UNELLEZ.

III.2.- Descripción de los métodos y sus componentes esenciales

El procedimiento propuesto para la determinación de los parámetros físicos del suelo, requeridos para la modelación de sus Pro Hid a través del programa *SPAW* y su posterior uso, fueron definidos en tres fases; la fase 1, que corresponde a las formas de procura de la información básica requerida y complementaria, la fase 2, que procede a la modelación de las Pro Hid del suelo, y la fase 3, que propone y ejemplifica la utilidad agronómica de las Pro Hid en la gestión hídrica del suelo para el manejo de los cultivos.

III.3.- Fase 1.- Información básica y complementaria requerida

III.3.1.- Información básica requerida

III.3.1.1.- Métodos para la obtención de la información edafoclimática

La determinación de los parámetros físicos del suelo a ser utilizados para la modelación de las Pro Hid del suelo a través del programa *SPAW*, se realizó mediante muestreo sistemático aleatorio (probabilístico), el cual consistió en tomar las muestras siguiendo un patrón irregular pero preestablecido, en función de los aparentes cambios de suelo y del área de extensión de cada lote (ver figura 3), de modo tal, de generar una nube de puntos que refleje representatividad espacial, al reducir la variabilidad de la muestra de acuerdo con Lozano (2006) y así conformar muestras compuestas por cada unidad aparente de suelo. Las muestras de suelo obtenidas en campo fueron procesadas y analizadas en el laboratorio de edafología de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora (Lab-UNELLEZ) Guanare, de acuerdo a los métodos resumidos en la tabla 1. Así, se obtuvieron los valores de granulometría y se identificaron las clases texturales, además de los valores del contenido de *MO* y conductividad eléctrica.

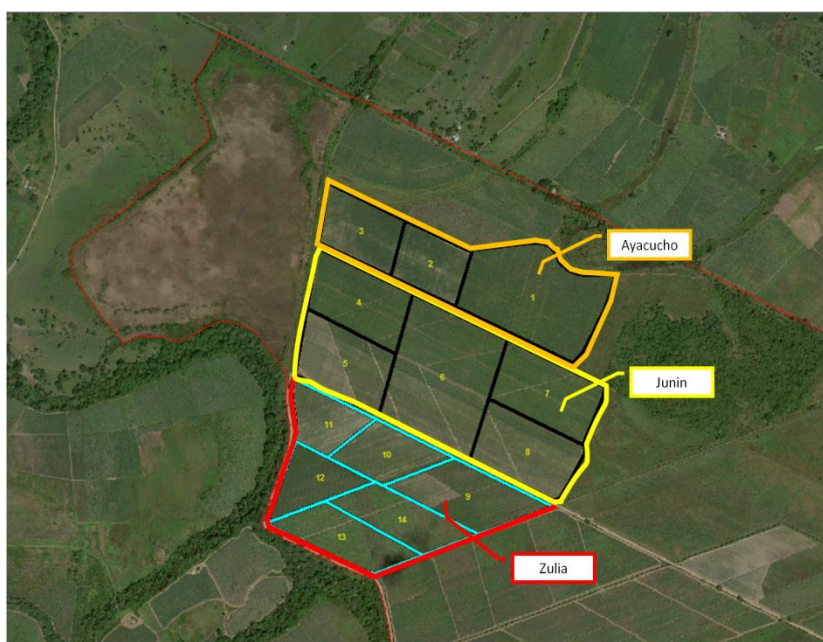


Figura 3.- Lotes muestreados y número de muestras

Tabla 1.- Métodos de estimación de los parámetros físicos del suelo.

Características	Parámetros	Método	Muestra
Físicas	Granulometría (%)	Bouyoucos	Compuesta
	Clase Textural	Triangulo textural	Compuesta
	Contenido de MO	Walkley& Black	Compuesta
	Conductividad Eléctrica	Conductimétrico	Compuesta

Fuente: Consulta a Lab-UNELLEZ (2022)

Por otra parte, la información climática requerida para el uso de las *Pro Hid* modeladas, fue obtenida de registros propios de la finca, y desde la base de datos del programa de la FAO *ClimWat 2.0 para CropWat 8.0*, descargado desde el sitio web oficial: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/es/> (anexos A y B, respectivamente), debido a la imposibilidad de contar con datos oficiales por parte Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). Así, el programa *ClimWat 2.0*, es una base de datos climática que se utiliza en combinación con el programa informático *CropWat* y permite el cálculo de los requisitos de agua de los cultivos, el suministro de riego y la programación del riego para varios cultivos para una variedad de estaciones climatológicas en todo el mundo, publicado de manera conjunta por la *Unidad de Desarrollo y Gestión del Agua* y la *Unidad de Cambio Climático y Bioenergía* de la FAO.

Tabla 2.- Parámetros necesarios para correr el modelo *CropWat 8.0*

Componente	Parámetros	Modo de obtención
Climatológicos	Clima	Programa <i>ClimWat 2.0</i> para <i>CropWat 8.0</i> . Localidad Guanare, Venezuela (ver anexo A)
	Precipitación	Registros históricos en el área de estudio (ver anexo B)
Edáficos	Humedad del suelo disponible total (ADT) ⁽¹⁾	Muestras de suelo y determinación posterior a partir de textura, MO y SPAW
	Profundidad radical máxima	Basado en Peña (2012)
	Tasa máxima de infiltración	Vargas (2015)
	Agotamiento inicial de humedad del suelo ⁽²⁾	Allen <i>et al.</i> , 1998
Fisiológicos	Fechas de siembra	Dato de campo
	Coefficientes de cultivo ⁽³⁾ y duración de las etapas de desarrollo	Reportados por Trezza <i>et al.</i> (2008) y <i>CropWat</i> , y utilizados por Vargas (2015)
	Profundidad Radical	Wagner <i>et al.</i> , 1995
	Fracción de agotamiento crítico ⁽⁴⁾	Allen <i>et al.</i> , 1998
	Factor de respuesta al rendimiento (Ky)	Doorenbos <i>et al.</i> , 1979
Configuración ⁽⁵⁾	Opciones de <i>CropWat</i>	Configuración FAO por defecto
	Velocidad del viento	En m s ⁻¹
	Eficiencia de riego	Vargas (2015)
	Precipitación efectiva	Vargas (2020)

⁽¹⁾ = La disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas y se conoce como Humedad del suelo disponible total (ADT) (Allen *et al.*, 1998).

⁽²⁾ = Se asume que el contenido de humedad en la zona radical estará cerca de la capacidad de campo, ya que se aplicará riego 3 días después de la cosecha.

⁽³⁾ = Relacionan los efectos de la transpiración de las plantas y la evaporación que ocurre a partir de las superficies húmedas del suelo.

⁽⁴⁾ = El valor de “p” representa el nivel crítico de humedad en el suelo a partir del cual ocurre estrés por falta de agua, lo cual afecta la ETo del cultivo y por ende su producción. Estos valores son expresados como

una fracción del ADT y pueden ser ajustados para diferentes valores de ETo a través de la siguiente expresión:

$$P_{aju} = P_{(Cuadro 22)} + 0,04 (5 - ETo)$$

Donde: ETo = 4,62 mm día⁻¹ (Promedio de ETo de los meses secos; Nov, Dic, Ene; Feb, Mar y Abr, de acuerdo al balance hídrico).

⁽⁵⁾ = En las opciones de configuración fueron establecidos los valores por defecto de la FAO, exceptuando las unidades de “Velocidad del viento”, el método utilizado para calcular la “Precipitación efectiva” y el valor de “Eficiencia de riego”.

Por otra parte, los valores de *Infiltración Básica* y la *Profundidad Radical Máxima* requeridos en el programa *CropWat*, fueron tomados de forma referencial de la literatura especializada, mientras que los datos de *Humedad del suelo disponible total (ADT)*, fueron obtenidos a partir de la modelación de las Pro Hid del suelo, producto de la corrida del programa *SPAW*. Finalmente, los datos de cultivo fueron obtenidos de la literatura especializada, como se muestra en la tabla 2.

III.3.2.- Información complementaria

La ubicación geográfica del predio seleccionado para la ejemplificación del método propuesto, fue determinada con el uso de la herramienta *ArcGIS10.5*, con basamento en la ubicación relativa. Por otra parte, la vegetación nativa fue caracterizada de acuerdo al sistema *HOLDRIDGE* señalada por Ewel *et all.* (1976) y Salas y Quero (1983). Para la determinación generalizada de la condición morfológica de los suelos fueron consultadas las cartas correspondientes a escala 1:25.000 y 1:100.000, que reposan en la unidad de Cartografía y Topografía de la UNELLEZ Guanare. La caracterización climatológica estuvo basada en la influencia de la estación meteorológica del Aeropuerto Nacional Virgen de Coromoto (ANVC) serial 2296, ubicada en la ciudad de Guanare, estado Portuguesa a 9,0427° de latitud y -69,76° de longitud, y una altitud de 163 msnm, seleccionada no solo por ser la más cercana, sino por estar en similar piso altitudinal.

III.4.- Fase 2.- Modelación de las Pro Hid del suelo

La modelación de las Pro Hid del suelo fue realizada desde el modulo *Soil Water Characteristics*, incorporado en el programa *SPAWy* presentado por Saxton *et all.* (2006), en concordancia con lo señalado por Saxton y Rawls (2006) y complementado por Zavala *et all.* (2018).

III.5.- Fase 3.- Utilidad agronómica de las Pro Hid del suelo

La utilidad agronómica de las *Pro Hid* del suelo es muy diversa, tanto en su valoración, como en los métodos o procedimientos generales empleados en cada caso. Estos son innumerables y el volumen crece de manera incalculable si se incluyen las técnicas específicas que se utilizan en los diferentes campos de aplicación. No obstante, en el presente trabajo se proponen algunos métodos para la utilización de las *Pro Hid* del suelo, no solo por estar suficientemente justificados y valorados, sino porque además, involucran las variables físicas del suelo de fácil obtención (textura y *MO*).

De tal manera, que para la cuantificación del balance hídrico edáfico y la demanda de agua del sistema, se utilizó la metodología descrita por Arteaga *et all.* (2011), quienes utilizaron el programa *CropWat* para la programación y el manejo del recurso hídrico en plantaciones de caña de azúcar. Por su parte, los indicadores de la labranza basados en la textura y el contenido de *MO*, fueron calculados con el uso del modelo para estimar el LSL del suelo propuesto por Cadena *et all.* (2010), por considerar que las variables que mejor lo predicen son los porcentajes de *MO*, arcilla y limo (ver ecuación 5). Por su parte, el índice de trabajabilidad (IT) fue expresado por la relación entre CC/LSL , al ser considerado por Pérez y Florentino (2014) como un buen indicador de los riesgos de deterioro del suelo frente al manejo mecanizado, y dada su premisa de que la curva de retención de humedad del suelo, refleja adecuadamente los cambios en la trabajabilidad de suelos no plásticos o bien en condiciones naturales.

$$LSL = 1.5446 \times MO + 0.4243 \times Ar + 0.2387 \times Li$$

Ecuación 5.- Modelo para estimar el Límite Superior de Laborabilidad del suelo

Donde: MO = materia orgánica (%)

Ar = Arena (%)

Li = Limo (%)

La programación del riego se realizó a través de la metodología descrita y utilizada por Vargas (2015) en un primer intento por validar el uso del modelo predictivo *CropWat* para la programación del calendario de riego para cultivos comerciales de caña de azúcar (*Saccharumofficinarum*) y en un suelo particular (*Inceptisol*), al evaluar las relaciones existentes entre la programación del riego de la caña de azúcar (a partir de la información climática disponible y la información edáfica local) y su ejecución, en función de las variables; periodos inter-riego, lámina o volumen de agua aplicado y la producción estimada, con la finalidad de poder utilizarlo como herramienta en la agricultura cañera de la región.

Para inferir sobre las mejoras en las propiedades hidráulicas del suelo con el incremento del contenido de *MO*, se procedió a cargar en el módulo *Soil Water Characteristics* del programa *SPAW*, los datos de textura y salinidad promedio correspondientes a cada lote. Posteriormente, se procedió a ejecutar la predicción una vez incorporados de manera ascendente y progresiva los valores simulados de contenido de *MO* desde 1 hasta 7%, al considerar los valores mínimos deseables mencionados Julca *et all.* (2006) para diferentes clases texturales y el valor máximo admitido por Saxton y Rawls (2006) en los estudios previos. Los resultados de PMP, CC, Saturación (Sat), agua disponible (AD) y K_0 obtenidos de la simulación fueron tabulados y procesados con el uso del programa *Excel 2007*, para luego calcular el incremento porcentual de las *Pro Hid* del suelo, en función del incremento por unidad porcentual de *MO* en el suelo, como variación (Δ) de PMP, CC, Sat. y K_0 , a través de la ecuación 6.

$$\Delta\%_j = (\Delta_j - 1) * 100$$

Ecuación 6.- Variación porcentual de la propiedad hidráulica analizada

Donde: $\Delta\%j$ = variación porcentual de la propiedad hidráulica analizada

$$\Delta j = \text{variación de la propiedad hidráulica analizada, dado por: } \Delta j = \frac{j_2}{j_1}$$

j = propiedad hidráulica analizada; PMP, CC, Sat. y K_0

Los valores obtenidos de K_0 fueron graficados y se les determinó el coeficiente de determinación (R^2) a través de la ecuación de mejor ajuste para reflejar la bondad de ajuste del modelo utilizado por el programa *SPAW* con la variable hidráulica del suelo (Negrín, 1982).

III.6.- Caracterización de la propuesta

III.6.1.- Niveles metodológicos de la investigación

El método general de la siguiente investigación como definición del conjunto totalizador de operaciones a realizar corresponde a un *Estudio Prospectivo*, con técnicas de observación simple y directa, y el *Análisis de Componentes Principales* como técnica de análisis de datos (Morles, 2002), mediante la utilización de modelos computacionales de predicción, funciones de pedo-transferencia y análisis matemático de datos.

III.6.2.- Tipo de estudio

El tipo de estudio corresponde a una investigación *Aplicada* de acuerdo al propósito perseguido, y de tipo *No Experimental* por sus objetivos internos, sin un diseño experimental, ya que no pretende manipular deliberadamente las variables (Zafra, 2006). Por otra parte, el estudio se relaciona con la *Sistemática* o grupo de métodos para organizar conocimientos. Corresponde a los *Componentes Lógico* (métodos propiamente dichos) y *Operativo*, ya que utiliza conjuntos estructurados y sistémicos de procesos lógicos (generales y operativos), dentro de un modo de producción intelectual, y porque adopta y aplica un conjunto de operaciones, procedimientos e instrumentos concretos, como componentes de un método general, para resolver un problema particular (Morles, 2002).

III.6.3.- Población y muestra

Para la ejemplificación de la propuesta de simulación de los parámetros hidráulicos del suelo fueron seleccionados tres lotes con un área conjunta de 134,5ha, ubicadas en zona Las Vegas al norte de la finca y denominados Ayacucho con 46,43ha, Junin con 51,43ha y Zulia con 36,64ha, que representan el 35; 38 y 27% del área muestral, respectivamente, integrantes de un superficie total del predio que abarca una extensión de 3.800ha (aproximadamente) y distribuidas en tres zonas y 36 lotes.

III.7.- Resultados esperados

Con la siguiente investigación se pretende instituir una propuesta metodológica para el aprovechamiento de las virtudes del modelo *SPAW* en la modelación de las *Pro Hiddel* suelo a partir de sus componentes físicos de fácil obtención, como son la textura y el contenido de *MO*, para su posterior uso en la gestión hídrica de los cultivos. Además,

Se espera la inducción a la generación de líneas de investigación pertinentes en procura de mejorar la gestión hídrica de los suelos y los cultivos, tales como: indicadores de la calidad física del suelo, mitigación de la falta de información climática local, validación del uso del modelo *SPAW* en condiciones locales, requerimientos de agua de los cultivos y de los sistemas, costo monetario del agua de riego, indicadores de la labranza basados en el contenido de humedad del suelo, planificación del calendario de riego, determinación de coeficientes de cultivo locales, entre otros.

III.8.- Cronograma de actividades

Fase	Actividad	Sub actividad	Semana																
			1	2	3	4	5	6	7	8	9								
1	Procura de la información edáfica	Muestreo sistemático de suelo	■																
		Obtención de parámetros físicos			■														
	Procura de la información climática	Corrida del programa <i>ClimWat 2.0</i>		■															
		Obtención de la Información climática		■															
		Procura de registros de precipitación		■															
		Obtención de la Información de precipitación		■															
	Procura de la información diversa	Procura de los componentes edáficos para <i>CropWat 8.0</i>			■														
		Obtención de los componentes edáficos para <i>CropWat 8.0</i>			■														
		Procura de los componentes fisiológicos para <i>CropWat 8.0</i>			■														
		Obtención de los componentes fisiológicos para <i>CropWat 8.0</i>			■														
	Procura de la información complementaria	Procura de la ubicación geográfica del predio			■														
		Obtención de la ubicación geográfica del predio			■														
		Caracterizar la vegetación (sistema HOLDRIDGE)				■													
		Caracterización de la vegetación (sistema HOLDRIDGE)				■													
		Caracterizar la condición climática				■													
		Caracterización de la condición climática				■													
		Caracterizar la condición morfológica de los suelos				■													
		Caracterización de la condición morfológica de los suelos				■													
2	Modelación de variables hidráulicas	Modelar las variables hidráulicas del suelo						■											
		Obtención de las variables hidráulicas del suelo						■											
3	Ejemplificación del uso de las variables hidráulicas del suelo	Determinación del Balance hídrico edáfico y demanda de agua por los cultivos							■										
		Balance hídrico edáfico y demanda de agua por los cultivos							■										
		Determinación de indicadores de la labranza basados en la textura y el contenido de MO									■								
		Indicadores de la labranza basados en la textura y el contenido de MO									■								
		Establecer la programación del riego										■							
		Programación del riego											■						
		Inferir sobre las mejoras en las propiedades hidráulicas del suelo con el incremento del contenido de MO												■					
		Inferencia sobre las mejoras en las propiedades hidráulicas del suelo con el incremento del contenido de MO													■				

CAPÍTULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1.- Información requerida; Fase 1

IV.1.1.- Información edáfica

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de suelo emitidos por el *Lab-UNELLEZ* (Anexo C), con 3; 5 y 6 muestras, respectivamente para los lotes Ayacucho, Junin y Zulia, para completar un total de 14 muestras, se destacan dos clases texturales para el lote Ayacucho, tres para el lote Junin, mientras que para el lote Zulia fueron cuatro las clases texturales encontradas.

Tabla 3.- Valores promedios por lotes de las propiedades físicas (*Lab-UNELLEZ*)

Lotes y clase textural	Cantidad	MO	Arena	Arcilla	Limo	Salinidad
Ayacucho (FA)	3	3,03	22,3	32,7	45,0	0,37
Franco Arcillo Limoso	2	3,00	14,0	37,0	49,0	0,45
Franco	1	3,10	39,0	24,0	37,0	0,20
Junin (AL)	5	4,06	10,6	43,6	45,8	0,56
Arcillo Limoso	3	4,27	3,7	51,3	45,0	0,63
Franco Arcilloso	1	3,70	25,0	30,0	45,0	0,40
Franco Arcillo Limoso	1	3,80	17,0	34,0	49,0	0,50
Zulia (FAL)	6	3,43	13,7	32,3	54,0	0,27
Franco Arcillo Limoso	3	3,20	15,0	34,0	51,0	0,27
Franco Limoso	1	3,50	7,0	24,0	69,0	0,20
Arcillo Limoso	1	4,30	5,0	42,0	53,0	0,30
Franco	1	3,20	25,0	26,0	49,0	0,30
Total general	14	3,57	14,43	36,43	49,14	0,39

Nota: MO = Materia orgánica en %Peso

Arena, limo y arcilla en %Peso

Salinidad en dSm⁻¹

Los valores promedios de arena, arcilla y limo fueron de a) 22,3%, 32,7% y 45,0%, b) de 10,6%, 43,6% y 45,8% y c) de 13,7%, 32,3% y 54,0%, lo cual sugiere texturas promedio de “media” (Franco Arcilloso), “fina” (Arcillo Limosos) y “fina” (Franco Arcillo Limoso), respectivamente, para los lotes Ayacucho, Junin y Zulia. Mientras que los promedios generales de 14,43%; 36,43% y 49,14% para arena, arcilla y limo, respectivamente, sugieren una textura general “fina” (Franco Arcillo Limoso) como promedio del área total, de acuerdo con Andrade *et al.* (2014).

Estos suelos presentan alta *CRA* y nutrimentos, considerados como los de más alta fertilidad natural. Cuando los niveles de *MO* son adecuados, estos suelos suelen ser muy productivos, ya que se le brindan a las raíces las condiciones de aireación, humedad y alto contenido de nutrientes. No obstante, su manejo puede ser complicado, ya que pueden compactarse fácilmente cuando se labran o se cultivan en condiciones húmedas, en comparación con los de texturas gruesas (INTAGRI, 2017).

Por su parte, los valores promedios de Salinidad y de *MO* corresponden a 0,37dS m⁻¹ y 3,03%, 0,56dS m⁻¹ y 4,06% y 0,27dS m⁻¹ y 3,43%, respectivamente, para los lotes Ayacucho, Junin y Zulia. Mientras que los promedios generales corresponden a 0,39dS m⁻¹ y 3,57%, respectivamente para los mismos parámetros. Estos valores permiten inferir sobre la presencia de suelos “no salinos”, de acuerdo a la clasificación de suelos salinos, propuesta por el *US Salinity Laboratory*(Richards, 1954) y utilizada por Narváez *et all.* (2014), según se muestra en la tabla 4, mientras que por su parte, la *MO* en general supera el 2% mencionado por Gros y Domínguez (1992) y citados por Julca *et all.* (2006) como nivel deseable en los suelos arcillosos medios, el 1,65% para suelos pesados y el 2,5% en los arenosos.

Tabla 4.- Clasificación de suelos salinos

Categoría	Rango	Clasificación
I	< 2dS m ⁻¹	No salinos
II	2 - 4 dS m ⁻¹	Ligeramente salinos
III	4 – 8 dS m ⁻¹	Medianamente salinos
IV	8 – 16 dS m ⁻¹	Fuertemente salinos
V	> 16 dS m ⁻¹	Extremadamente salinos

Fuente: Narváez *et all.* (2014)

IV.1.2.- Información climática

Los datos de precipitación representativos del área de estudio incluyen el registro de 43 años consecutivos, desde 1979 hasta el año 2021 (anexo A), lo cual se ajusta al rango mínimo de 40 años recomendado por Jagannathan *et all.* (1967) citados por Pérez *et all.* (2007) para éste parámetro en zonas de llanura intertropical, y en concordancia con Guevara (2003), quien señaló que el periodo optimo de registros para el análisis de una serie climática, estará en

dependencia del elemento climático y del tipo de clima regional, por lo tanto, a mayor variabilidad del elemento climático, la duración de la serie de datos debe ser mayor.

El régimen pluviométrico mostrado en la figura 4, refleja un patrón unimodal de distribución de las precipitaciones que caracteriza a la región, con pico de precipitación desde mayo a agosto, que conduce a excesos de agua en los horizontes superficiales, y que requieren ser evacuados a través de la realización de prácticas de drenaje para evitar problemas en el cultivo, y con déficits hídricos marcados que van desde noviembre a marzo, lo cual obliga a la aplicación del riego para lograr un desarrollo adecuado del cultivo (Barrios y Florentino, 2008).

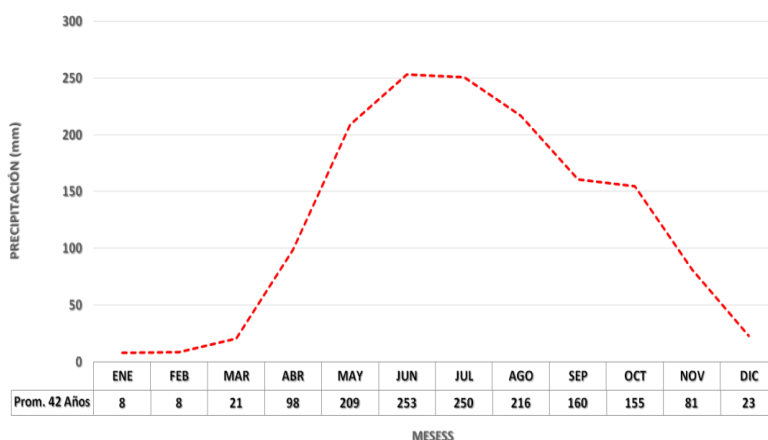


Figura 4.- Distribución promedio de la precipitación anual

Por su parte, la información climática requerida por el modelo *CropWat 8.0* y descargada desde la base de datos *ClimWat 2.0*, presenta los valores promedios mensuales y anuales para los variables climáticas Temperatura Mínima, Temperatura Máxima, Humedad Relativa, Velocidad del viento y horas de Insolación(anexo B), lo cual representa una alternativa útil a la necesidad de información relacionada al clima, ya que de acuerdo con Guevara (2006), la derivación de información climática proveniente de sitios con estaciones agroclimatológicas es una condición excepcional en casi todos los países y en especial, los ubicados en zonas intertropicales.

IV.1.3.- Información diversa

Los datos necesarios en cada uno de los módulos del modelo *CropWat 8.0* y los ajustes de los parámetros de configuración para la generación de los calendarios de riego, son presentados en tabla 5.

Tabla 5.- Información básica requerida por el modelo *CW8*.

Menú <i>CropWat</i>	Parámetros requeridos	Valores	Fuente
Módulo de cultivo	Fechas de siembra	Lote Ayacucho: 13/09. Lote Junin : 13/10 y Lote Zulia: 13/10	Agroinversiones Orión
	Coeficientes de cultivo	Inc = 0,5; Des = 1,25; Fin = 0,74	Trezza <i>et al.</i> , 2008 y <i>CropWat</i> y Vargas (2015)
	Duración de las etapas de desarrollo (días)	Inc = 60; Des = 60 Med = 150; Fin = 90	
	Profundidad Radical	Ini = 0,2 m; Des = 0,4 m	Wagner <i>et al.</i> , 1995
	Fracción de agotamiento crítico	0,67	Allen <i>et al.</i> , 1998
	Factor de respuesta al rendimiento (Ky)	Inc = 0,5; Des = 0,6 Med = 1,5; Flo = 0,9; Fin = 1,5	Doorenbos <i>et al.</i> , 1979
	Altura del cultivo	3 m	Asumido
Módulo de suelo	Humedad del suelo disponible total (ADT)	Modelo SPAW	Determinado
	Profundidad Radical Máxima	0,7m	Peña (2012) (*)
	Tasa máxima de infiltración	77mm día ⁻¹	Vargas (2015)
	Agotamiento inicial de humedad del suelo	0 %	Allen <i>et al.</i> , 1998
Configuración	Opciones de <i>CropWat</i>	Conf. FAO por defecto	Asumido
	Eficiencia del sistema de riego	30%	Vargas (2015)
	Precipitación efectiva	-----	Análisis de métodos
	Velocidad del viento	En m s ⁻¹	Asumido

(*) = Basado en el valor de 0,8m reportado por Peña (2012), pero manteniendo la discreción por la sospecha de compactación.

IV.1.4.- Información complementaria

El área para la propuesta pertenece a la finca Agripaca, ubicada en el sector los Cocos, kilómetro 29 de la carretera vía Morita, en el municipio Papelón del estado portuguesa, a unos 30km al sur de la ciudad de Guanare. Geográficamente se encuentra ubicada entre las coordenadas (*Universal Transversal Mercator* (UTM) Huso 19, *Datum* – SIRGAS REGVEN) 997881 y 994814 (Norte) y 429678 y 430758 (Este). La vegetación característica corresponde al bosque seco tropical (sistema HOLDRIDGE; Ewel *et al.* (1976) y Salas y Quero (1983). Estos lotes fueron seleccionados por presentar un plan la disponibilidad y cercanía de la fuente de agua y por de riego.

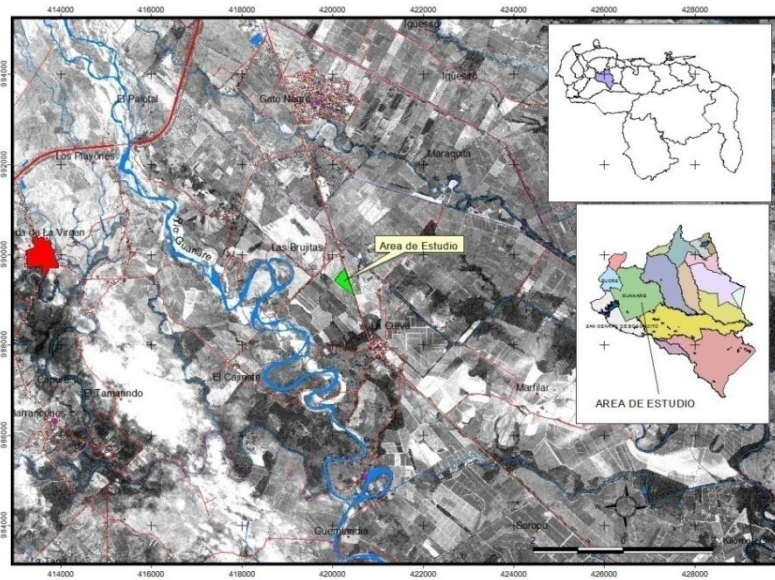


Figura 5.- Ubicación relativa del área de estudio.

La caña de azúcar (*Saccharum ofissinarum*) es el monocultivo comercialmente establecido en el predio, y el principalmente dominante en la zona, debido a diversos factores que favorecen su establecimiento, tales como; la presencia de centrales azucareros, topografía plana, clima y suelos con alta capacidad de retención de humedad para riego por gravedad, problemas de drenaje moderados con posibilidad de corrección, adecuada suplencia de elementos nutritivos, pH y *Ce* adecuados, de acuerdo con Andrade *et all.* (2014).

El área de estudio presenta suelos con condiciones morfológicas y tipo de paisaje clasificado como planicie de desborde y planicie de explayamiento y un tipo de relieve de llanura de desborde o desbordamiento, los cuales pertenecen al orden *Inceptisoles* donde se incluye el gran grupo *Ustropepts* con 14% de prevalencia. Su asociado más importante corresponde al orden *Entisoles*, el cual incluye el gran grupo *Ustorthents* (escala 1:100.000). Morfodinámicamente, la infiltración y el escurrimiento suscitan sobre pendientes muy bajas (menor al 1%), por lo tanto la erosión hídrica es muy baja o muy débil y muy localizada (Salas y Quero, 1983). No obstante, las principales características o cualidades de estos suelos, exceptuando su fertilidad y profundidad, no son limitantes para el aprovechamiento agrícola (MAT-CVA, 2005).

Climatológicamente, el área de estudio está influenciada por la estación meteorológica del Aeropuerto Nacional Virgen de Coromoto (ANVC) serial 2296, ubicada en la ciudad de Guanare, estado Portuguesa a 9,0427° de latitud y -69,76° de longitud, y una altitud de 163 msnm, la cual se seleccionó no solo por ser la más cercana, sino por estar en similar piso altitudinal. En promedio, la precipitación media anual es de unos 1.615,3mm y se distribuye entre los meses de abril a noviembre, con valores máximos en junio y julio. El periodo seco va desde diciembre hasta marzo. La evaporación presenta valores promedios de 1.840,9mm año⁻¹, una humedad relativa aproximada de 75% anual y temperatura promedio de alrededor de 26,2°C año⁻¹(INAMEH, 2012).

IV.2.- Modelación de las propiedades hidráulicas del suelo; Fase 2

Los valores de los *Pro Hiddel* suelo modeladas para cada muestra (modelo *SPAW*) son presentadas en la tabla 6. La CC, el PMP y el AD exhiben valores mínimos y máximos de 30,4 a 42,7% Vol, 16,1 a 32,2% Vol y 0,11 a 0,20cm cm⁻¹, respectivamente. Así mismo, los valores mínimos de Saturación y K₀ se fijan en 47,5% Vol y 5,09mm hr⁻¹, respectivamente, mientras que para éstos mismos parámetros, los valores alcanzan un máximo de 56,4% Vol y 13,36mm hr⁻¹, respectivamente.

Tabla 6.- Propiedades hidráulicas de los suelos por muestra; modelo *SPAW*

Muestra	Lote	Clase Textural	PMP	CC	Sat	AD	K ₀
1	Ayacucho	Franco Arcillo Limoso	22,5	38,0	51,7	0,16	6,58
2	Ayacucho	Franco	16,3	30,4	47,5	0,14	12,75
3	Ayacucho	Franco Arcillo Limoso	23,2	38,9	51,5	0,16	5,09
4	Junin	Franco Arcilloso	19,6	35,4	50,9	0,16	9,62
5	Junin	Franco Arcillo Limoso	21,5	37,6	52,5	0,16	8,42
6	Junin	Arcillo Limoso	29,2	41,7	56,4	0,13	7,25
7	Junin	Arcillo Limoso	32,2	42,7	56,0	0,11	5,28
8	Junin	Arcillo Limoso	28,4	41,4	55,2	0,13	6,18
9	Zulia	Franco Arcillo Limoso	22,3	38,2	51,9	0,16	6,63
10	Zulia	Arcillo Limoso	25,3	40,4	55,8	0,15	8,79
11	Zulia	Franco Arcillo Limoso	22,2	38,2	51,5	0,16	6,01
12	Zulia	Franco Limoso	16,1	36,6	53,4	0,20	13,36
13	Zulia	Franco Arcillo Limoso	19,3	36,3	51,6	0,17	9,40
14	Zulia	Franco	17,3	33,7	49,7	0,16	10,98

Nota: PMP, CC y Sat en % Vol, AD en cm cm⁻¹, K₀ en mmhr⁻¹

Por otro lado, los valores promedio de los parámetros hidráulicos del suelo; PMP, CC y AD, calculados a partir del programa *SPAW*, resultaron en a) 20,67% Vol, 35,77% Vol y 0,15cm/cm, b) 26,18% Vol, 39,76% Vol y 0,14 cm/cm y c) 20,42% Vol, 37,23% Vol y 0,17 cm/cm, respectivamente, para los lotes Ayacucho, Junin y Zulia. Mientras que los promedios generales para los mismos parámetros, comprendió los 22,53% Vol, 37,82% Vol y 0,15 cm/cm.

Tabla 7.- Valores promedios de las propiedades hidráulicas de los suelos; modelo *SPAW*

Lotes y clase textural	Cantidad	PMP	CC	Sat	AD	K₀
Ayacucho (FA)	3	20,67	35,77	50,23	0,15	8,14
Franco Arcillo Limoso	2	22,85	38,45	51,60	0,16	5,84
Franco	1	16,30	30,40	47,50	0,14	12,75
Junin (AL)	5	26,18	39,76	54,20	0,14	7,35
Arcillo Limoso	3	29,93	41,93	55,87	0,12	6,24
Franco Arcilloso	1	19,60	35,40	50,90	0,16	9,62
Franco Arcillo Limoso	1	21,50	37,60	52,50	0,16	8,42
Zulia (FAL)	6	20,42	37,23	52,32	0,17	9,20
Franco Arcillo Limoso	3	21,27	37,57	51,67	0,16	7,35
Franco Limoso	1	16,10	36,60	53,40	0,20	13,36
Arcillo Limoso	1	25,30	40,40	55,80	0,15	8,79
Franco	1	17,30	33,70	49,70	0,16	10,98
Total general	14	22,53	37,82	52,54	0,15	8,31

Los porcentajes de arena, arcilla y limo oscilan entre 1 a 39%, 24 a 56% y 37 a 69%, respectivamente. Por su parte, los valores de Salinidad y de MO se mantuvieron entre los rangos de 0,2 a 0,7dS m⁻¹ y 2,6 a 4,3%.

Relacionado con la temática de la estimación de las constantes de humedad, Domingo et al (2006) manifiestan que la capacidad de retención de agua en el suelo es un parámetro de base física utilizado por técnicos forestales e investigadores en ecología forestal del territorio español, como uno de los factores estimadores de las disponibilidades de agua para las plantas, la bondad de estos parámetros se contrasta mediante el análisis de correlaciones, con resultados satisfactorios.

Martínez y Ceballos (2001) expresan que existen tres variables de predicción para estimar la humedad, tales como: las fracciones texturales, la densidad aparente y ocasionalmente la materia orgánica; estos autores afirman que los porcentajes de varianza explicada por las ecuaciones de regresión son siempre altos y que la bondad de las estimaciones, en términos de error medio y de raíz del error cuadrático medio, ha sido muy satisfactoria.

por lo que el conocimiento práctico de parámetros como la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente son claves para realizar programas de producción agrícola.

Se recurre a la estimación indirecta, porque los cálculos directos son realizados en laboratorios de suelos distantes y regularmente tienen alto costo. Esta investigación trae soluciones sencillas de gran utilidad a los campesinos locales mediante la determinación de modelos estadísticos que permiten calcular estos parámetros de humedad a través de la obtención de datos de campo representativos.

la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente, que fueron consideradas como variables dependientes,

la textura mediante el uso de hidrómetro; la densidad aparente del suelo por la metodología de la probeta según Cervantes y Mojica, (1981); la materia orgánica por el método de Walkey y Black (1938); y la Conductividad Eléctrica formulando una solución de suelo y agua en una relación 1:2.5, para lo cual se utilizó un conductímetro digital (Calderón y Pavlova, 1999), todas estas mediciones fueron consideradas como variables independientes.

programa de cómputo INFOSTAT propuesto por Di Rienzo et al (2001), para la regresión lineal múltiple

Posteriormente se establece un segundo modelo que incluye sólo las variables con alta significación, determinando su porcentaje de explicación, sobre la variabilidad de las variables dependientes, a través del estadístico Eta Cuadrado.

Se considera, por tanto, que los modelos generados para determinar las constantes de humedad pueden utilizarse adecuadamente para estudios a nivel local, ya que presentan alta probabilidad de exactitud. Es importante señalar que, utilizados adecuadamente, constituyen herramientas de apoyo a la gestión del manejo del agua en la región

Los estudios relativos a la estimación indirecta de la capacidad de campo y el punto de marchitez, son escasos, existiendo algunas investigaciones relativas al tema de la humedad como la realizada por Castellaro y Squella (2006), quienes elaboraron un modelo simple de crecimiento, fenología y balance hídrico de praderas anuales en clima mediterráneo.

Damiano y Taboada (2000) expresan que la producción de cultivos agrícolas depende, además de los aportes externos de agua, de la capacidad de agua disponible de los suelos (CAD) y su cálculo surge usualmente de conocer previamente la retención de humedad entre dos valores discretos de potencial mátrico (i.e. -33 kPa y - 1500 kPa) y la determinación de estos valores, tanto en campo como en laboratorio, es costosa en tiempo y recursos, además de demandar un gran número de muestras debido a la variabilidad espacial del suelo.

La determinación de la capacidad de retención de agua de los suelos de la cuenca del Río Torja, mediante la utilización de los modelos determinados, es congruente con el análisis de la clase textural (Tabla 3).

Puede aseverarse entonces que la capacidad de retención de humedad muestra una estrecha relación con la textura de los suelos, puesto que los valores más altos nos indican la presencia de suelos arcillosos, mientras que la disminución del valor de la capacidad de retención nos indica la tendencia hacia suelos con granulometría media o gruesa (Sandoval, 2007).

La diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, determina la capacidad de retención de humedad en los suelos, parámetro con múltiples fines para la planificación agrícola. Cicas 2014

Falta hacer algún comentario

IV.3.- Uso de las propiedades hidráulicas del suelo; Fase 3

IV.3.1.- Cuantificación del balance hídrico edáfico y demanda de agua del sistema

En la figura 6 se presentan los valores resumidos promedio de la cuantificación de los balances hídricos edáficos y el déficit de precipitación calculados para cada lote (anexos D, E y F, requerimientos hídricos del cultivo). Los requerimientos de riego basados en el déficit de precipitación aumentarían progresivamente desde el mes de noviembre, hasta alcanzar sus topes máximos en el mes de marzo con 153,9; 154,2 y 150,5mm para los lotes Ayacucho, Junin y Zulia respectivamente, desde donde comenzarían a descender hasta el valor de cero en los meses de abril y mayo para todos los lotes, debido al inicio del periodo de precipitaciones.

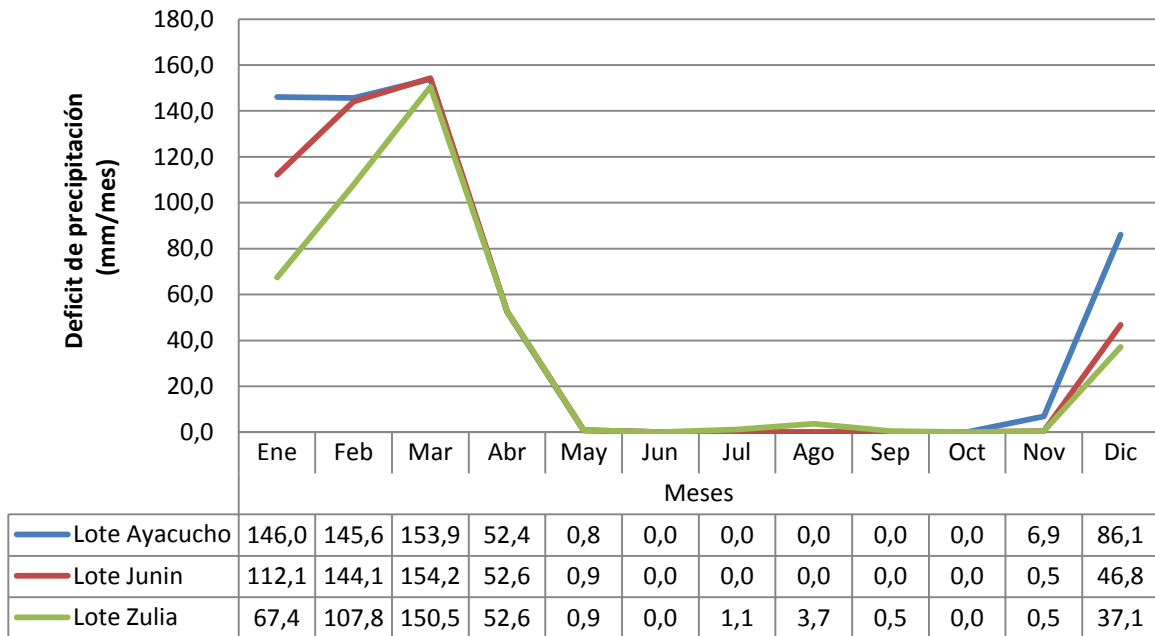


Figura 6.- Balance hídrico edáfico y el déficit de precipitación

Esta variabilidad estaría directamente afectada por las fechas de siembra, de tal modo, que siembras tempranas suponen mayor tiempo de exposición del cultivo durante los meses de déficit de precipitación durante el primer año. Esta situación repercutiría en una mayor inversión en tiempo y dinero respecto a las labores de riego, ya que; a mayor demanda, mayor

esfuerzo para compensarla (ver tabla 8). Por otra parte, la fecha de siembra del lote Zulia sugiere un menor tiempo de espera para la cosecha, ya que ésta no obedece al índice de madurez, sino a la disponibilidad de recepción por parte de la agroindustria, que suele ser entre diciembre y abril, regularmente.

Tabla 8.- Requerimiento hídrico total y costos totales por concepto de riego

Lote	Requerimientos hídricos		Superficie (ha)	Costo** (\$ ha ⁻¹)	Costo Total*** (\$)
	(mm)*	(m ³ ha ⁻¹)			
Ayacucho	600,3	6003	46,43	468,2	21.740,10
Junin	511,2	5112	51,43	398,7	20.506,99
Zulia	416,0	4160	36,64	324,5	11.888,95

Nota: * = tomados de los anexos D, E y F

** = 0,078\$ m³. Basado en los 1,56 pesos mexicanos reportados por Ramírez *et al.* (2019)

*** = Por ciclo (1 año)

El requerimiento global de agua del sistema, integrado por los lotes Ayacucho, Junin y Zulia, es presentado en la tabla 9. Se espera que la mayor demanda hídrica se presente durante los meses de enero, febrero y marzo, con requerimientos de 111,9; 134,8 y 153,1mm mes⁻¹, respectivamente, al promediar una demanda de 3,6; 4,8 y 4,9mm día⁻¹, en el mismo oren y para los meses indicados. De ahí, que la mayor demanda hídrica se presente en este periodo, con caudales netos requeridos para satisfacer las requerimientos del sistema, de 56,0; 74,9 y 76,7L s⁻¹, respectivamente para los meses de enero, febrero y marzo.

Tabla 9.- Déficit de precipitación o requerimientos de riego

Cultivos o Lotes	Parámetro	Meses											
		Ene	Feb	Mar*	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Requerimientos netos del sistema (RNS)	en mm día ⁻¹	3,6	4,8	4,9	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,9
	en mm mes ⁻¹	111,9	134,8	153,1	52,5	0,9	0,0	0,3	1,0	0,1	0,0	2,8	57,9
	en l/s/Ha	0,4	0,6	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
	en m día ⁻¹	0,0036	0,0048	0,0049	0,0018	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0019
Área Irrigada	% área total	100	100	100	100	100	0	27	27	27	0	100	100
Req. de riego área real	l/s/ha	0,42	0,56	0,57	0,20	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,22
Dosis riego	m ³ /día/ha	36,0	48,3	49,3	17,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	19,0
Dosis riego	l/día/ha	36000	48333	49333	17667	0	0	0	0	0	0	1000	19000
Caudal Neto Req. Sist.	l s ⁻¹	56,0	74,9	76,7	27,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	29,1
Nr de Pozos	Adimensional	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Caudal neto pozo ⁻¹	l s ⁻¹	56,0	74,9	76,7	27,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	29,1

Nota: * = representa al mes con mayor demanda hídrica

Dosis riego (m³/día/ha) = RNS (m día⁻¹) * 10.000 (m²)

Dosis riego (l/día/ha) = Dosis riego (m³/día/ha) * 1.000

Req. de riego área real = Dosis riego (l/día/ha) / 86.400s

Caudal Neto Req. Sist. = Area * Req. de riego área real

Tal variabilidad en la demanda hídrica, se debe no solo a la variabilidad textural encontrada y a que el movimiento del agua en el suelo, resulta ser altamente dependiente de las diferentes situaciones de manejo, aún para un mismo suelo (Filgueira *et all.*, 2006), que en nuestro caso se corresponde con las diferentes fechas de siembra. Por otra parte, la mayor demanda mensual se correspondería con el mes de marzo, y al considerar que la oferta hídrica puede ser aportada desde un único pozo, éste debería contribuir con $76,7L s^{-1}$ como mínimo, para satisfacer el requerimiento total del sistema.

La cuantificación del balance hídrico edáfico y la posterior estimación de las demandas de agua del sistema realizada para periodos mensuales, coincide con las necesidades de proyección del riego, de acuerdo con lo señalado por Claro (1991), quien aseguró que un balance hídrico con valores climáticos mensuales, señalará con toda claridad, la aparición de un déficit hídrico bien marcado en varios meses, durante los cuales no se pueden desarrollar los cultivos sin la suplencia artificial de agua, y así, la planificación del riego queda generalmente justificada, ya que el balance hídrico del suelo en equilibrio con el clima es una forma de cuantificar la condición hídrica de un área determinada para un intervalo de tiempo dado (Grassi, 1998).

IV.3.2.- Indicadores de la labranza basados en la textura y el contenido de MO

Los valores calculados por clase textural para *LSL* y *IT*, son presentados la tabla 10. Los valores del *LSL* oscilan entre 37,1 y 40,0% para la clase textural Arcillo limoso, entre 23,8 y 27,7% para el suelo Franco y entre 30,6 y 32,3% para la textura Franco Arcillo Limoso, mientras que para los suelos Franco Arcilloso y Franco Limoso, el *LSL* corresponde a 29,2 y 32,1%, respectivamente, debido a la ausencia de mayor número de datos. Por otra parte, el *IT* en general al incluir todas las clases texturales, oscila entre 1,05 y 1,28, lo cual es un indicativo de la susceptibilidad de estos suelos al daño estructural, de no permitir su drenaje a un punto de humedad ligeramente por debajo de *CC*, para que el contenido de humedad alcance el *LSL* (Pérez y Florentino, 2014).

Tabla 10.- Valores calculados por clase textural para *LSL* e *IT*

Lote	Clase Textural	CC (%Vol)	LSL (%Vol)	IT (CC/LSL)	% de CC
Junin	AL	41,7	39,6	1,05	94,9
Junin	AL	42,7	40,0	1,07	93,8
Zulia	AL	40,4	37,1	1,09	91,9
Junin	AL	41,4	37,7	1,10	91,2
Zulia	FL	36,6	32,1	1,14	87,6
Junin	FAL	37,6	32,0	1,18	85,1
Zulia	FAL	36,3	30,6	1,19	84,4
Zulia	FAL	38,2	32,1	1,19	83,9
Zulia	FAL	38,2	31,9	1,20	83,6
Ayacucho	FAL	38,0	31,7	1,20	83,5
Ayacucho	FAL	38,9	32,3	1,20	83,1
Junin	FA	35,4	29,2	1,21	82,4
Zulia	F	33,7	27,7	1,22	82,1
Ayacucho	F	30,4	23,8	1,28	78,3

Lo anterior significa que incluso después de haber drenado los suelos a *CC*, éstos seguirán estando demasiado húmedos (contenido humedad a $CC > LSL$), y dado que la trabajabilidad se ubica dentro del intervalo de humedad del suelo comprendido entre los límites húmedo (*LSL*) y seco (límite inferior para la labranza = *LIL*) para la labranza (Pérez y Florentino, 2014), estarán fuera del rango de contenido de agua para labranza ($LIL < u < LSL$), por lo que presentarán dificultades para ser laborados (Cadena *et al.*, 2010). Así mismo, los valores del *IT* superiores a 1,10 suponen una mayor dificultad para labrar el suelo compactado debido a su alto contenido de arcilla, en concordancia con Pérez y Florentino (2014), quienes reportaron dificultades similares para suelos de textura arcillosa.

Así, el contenido de humedad para que el suelo alcance el *LSL* se ubica ligeramente por debajo de *CC* en todos los casos, a valores de 91,2 a 94,9% para los suelos Arcillo limosos, de 78,3 a 82,1% para los suelos de textura Franca y desde 83,1 a 85,1% para los suelos Franco Arcillo limosos, lo que representa rangos de variabilidad de apenas 3,7%, 3,8% y 2%, respectivamente, mientras que para los suelos de textura Franco Arcilloso y Franco Limoso, éste contenido de humedad quedó fijado en 82,4% y 87,6%, respectivamente, al no disponer de mayor número de datos (para valores promedios por clase textural ver figura 7).

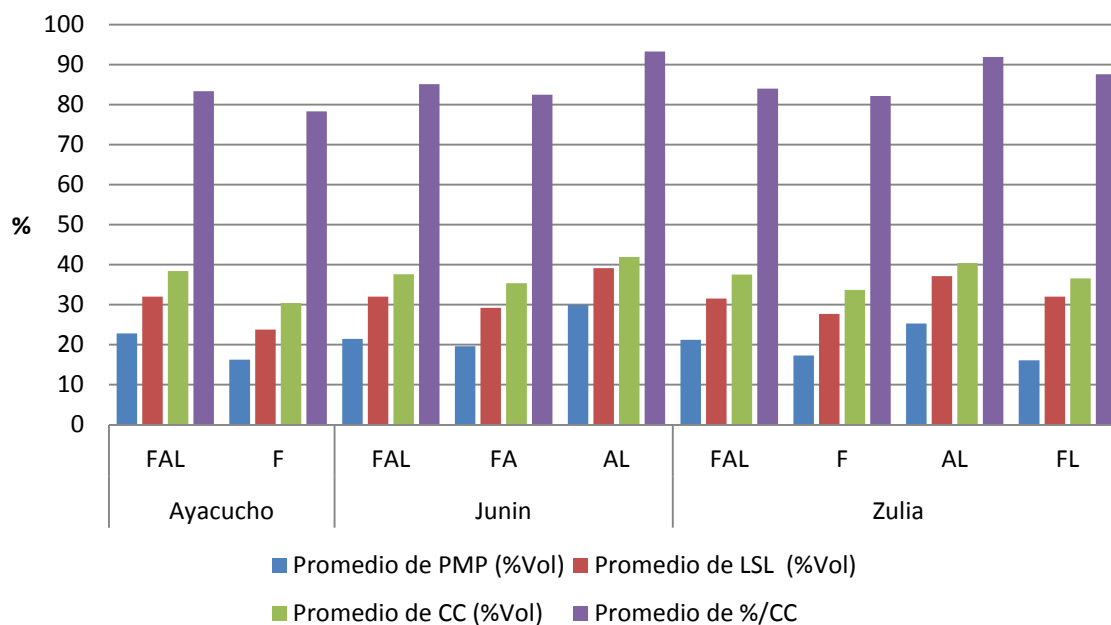


Figura 7.- Valores promedio CC, PMP, LSL y %/CC por clase textural

Estos resultados permiten inferir sobre los riesgos de compactación o deterioro del suelo que se presentan asociados al balance de agua en el mismo y al laboreo constante a través del tránsito de la maquinaria agrícola a contenidos de humedad superiores al *LSL*, lo cual exige mayor habilidad de los agricultores, no solo para mantener el potencial productivo del suelo (Pérez y Florentino, 2014), sino porque el costo de las labores y el riesgo de degradación de la estructura del suelo se incrementan cuando se realizan actividades de labranza en condiciones subóptimas de humedad (Cadena *et al.*, 2010).

De acuerdo con Dexter *et al.* (2005), el valor óptimo del contenido de agua para labranza, puede ser identificado con el contenido de agua en el punto de inflexión de la curva de retención de agua, no obstante, y debido a que las clases texturales encontradas se agrupan desde medias (F, FA y FL) a finas (FAL y AL) por sus altos contenidos de arcilla (Andrade *et al.*, 2014), es deducible que los rangos de laborabilidad se reducirían en la medida en que éste parámetro aumenta, particularmente por las dificultades de drenaje externo que suponen un incremento de los riesgos de degradación del suelo, al mantenerse de manera frecuente un balance de alta humedad en el suelo muy cercano a *LSL* o por encima de éste durante el

periodo húmedo (Pérez y Florentino, 2014), por lo que habría que ser más cuidadoso en el contenido de humedad al que se labore (Cadena *et al.*, 2010).

IV.3.3.- Programación del riego

Los calendarios de riego generados a través del modelo *CropWat* para los lotes Ayacucho, Junín y Zulia, son presentados en las tablas 11;12 y 13. El número total de eventos de riego se proyecta en 14; 13 y 9 días, respectivamente para los lotes Ayacucho, Junín y Zulia sin incluir el riego de establecimiento (de ser necesario) y afectados fundamentalmente por las fechas de siembra. Esto supone un ahorro operacional y económico con las plantaciones establecidas en el mes de noviembre, en comparación con las que son establecidas en los meses de septiembre y octubre, debido a la menor utilización de recursos disponibles para la suplencia hídrica de los campos.

Tabla 11.- Calendario de riego para el lote Ayacucho; modelo *CropWat*

N° R	Fecha	EC	A (%)	Ln (mm)	Lb (mm)	Q (ls ⁻¹ ha ⁻¹)
1	12-dic	Des	71	37,4	124,6	0,16
2	24-dic	Des	70	38,8	129,4	1,25
3	04-ene	Des	74	43,1	143,6	1,51
4	13-ene	Med	68	40,6	135,3	1,74
5	22-ene	Med	75	45,1	150,3	1,93
6	30-ene	Med	68	40,9	136,4	1,97
7	07-feb	Med	68	40,9	136,5	1,97
8	15-feb	Med	72	43,2	144,0	2,08
9	23-feb	Med	70	42,0	140,1	2,03
10	03-mar	Med	70	42,0	140,0	2,03
11	11-mar	Med	74	44,6	148,8	2,15
12	19-mar	Med	72	43,2	143,8	2,08
13	29-mar	Med	68	40,9	136,4	1,58
14	11-abr	Med	68	40,8	135,9	1,21
Totales				583,5	1945,1	

N° R. = Numero de riego; EC = Etapa del Cultivo; A = Agotamiento; Ln = Lamina neta; Lb = Lamina bruta y Q = Caudal.

La edad del cultivo y los Periodos Inter Riego (*PIR*) para cada lote son presentados en la tabla 14. Se refleja una variación de los *PIR* de 8 a 13 días para el lote Ayacucho, con sus valores máximos correspondientes al final de la etapa de desarrollo y a la etapa media del cultivo, mientras que para el lote Junin, los *PIR* oscilan entre 7 y 14 días, con sus valores máximos manifiestos a mediados de la etapa de desarrollo y al final de la media. Estos

resultados se asemejan a los valores de frecuencia fija de a 11 días y lamina variable en todas las etapas de desarrollo del cultivo utilizada por según Trezza (2008) en condiciones similares de suelo.

Tabla 12.- Calendario de riego para el lote Junin; modelo *CropWat*

N° R	Fecha	EC	A (%)	Ln (mm)	Lb (mm)	Q (l s ⁻¹ ha ⁻¹)
1	21-dic	Des	71	31,5	104,9	0,17
2	04-ene	Des	69	32,8	109,4	0,90
3	15-ene	Des	71	35,6	118,7	1,25
4	25-ene	Des	75	39,5	131,5	1,52
5	03-feb	Des	74	40,2	134,0	1,72
6	11-feb	Med	73	40,6	135,4	1,96
7	19-feb	Med	75	42,2	140,6	2,03
8	27-feb	Med	73	40,9	136,4	1,97
9	06-mar	Med	68	38,2	127,2	2,10
10	13-mar	Med	69	38,4	127,9	2,12
11	20-mar	Med	69	38,8	129,2	2,14
12	30-mar	Med	71	39,8	132,8	1,54
13	12-abr	Med	70	39,1	130,4	1,16
Totales				497,6	1658,4	

Tabla 13.- Calendario de riego para el lote Zulia; modelo *CropWat*

N° R	Fecha	EC	A (%)	Ln (mm)	Lb (mm)	Q (l s ⁻¹ ha ⁻¹)
1	22-dic	Ini	68	30,7	102,5	0,30
2	12-ene	Des	71	36,2	120,8	0,67
3	28-ene	Des	69	38,4	128,0	0,93
4	10-feb	Des	70	41,8	139,2	1,24
5	21-feb	Des	71	44,4	147,9	1,56
6	04-mar	Des	74	48,6	162,0	1,71
7	14-mar	Med	75	51,1	170,3	1,97
8	24-mar	Med	69	46,8	156,1	1,81
9	06-abr	Med	69	47,2	157,3	1,40
Totales				385,2	1284,1	

No obstante, el rango de los *PIR* para el lote Zulia se amplía desde los 10 a los 21 días, con sus valores máximos en las etapas media y desarrollo del cultivo, y pudiera estar relacionado con una alta capacidad de retención de humedad del suelo, debido a las clases texturales encontradas (F, FL, FAL y AL), con lo cual se deduce una textura general promedio como Franco Limoso, de acuerdo con Saxton y Rawls (2006).

Tabla 14.- Edad del cultivo y periodos inter-riego por lotes

Evento	Ayacucho		Junin		Zulia	
	Edad (días)	PIR (días)	Edad (días)	PIR (días)	Edad (días)	PIR (días)
1	90	90*	69	69*	39	39*
2	102	12	14	14	60	21
3	113	11	11	11	76	16
4	122	9	10	10	89	13
5	131	9	9	9	100	11
6	139	8	8	8	111	11
7	147	8	8	8	121	10
8	155	8	8	8	131	10
9	163	8	7	7	144	13
10	171	8	7	7		SR
11	179	8	7	7		SR
12	187	8	10	10		SR
13	197	10	13	13		SR
14	210	13		SR		SR

Nota: * = Desde la siembra (supone un primer riego de establecimiento). SR = Sin riego

Por otra parte, el primer riego (posterior al riego de establecimiento) se prevé ser aplicado a los 90; 69 y 39 días, respectivamente para los lotes Ayacucho, Junin y Zulia, y aunque esto pudiera generar un significativo déficit hídrico en los cultivos durante la etapa inicial, etapa en la cual, la caña de azúcar presenta mayor susceptibilidad fisiológica a las carencias hídricas, ya que se requiere un mantenimiento de la lamina de agua para la activación de las yemas germinativas (Pardo y Proaño, 2008), se espera que tal demanda sea cubierta por las precipitaciones, a sabiendas de que durante la fase de establecimiento, el desarrollo del sistema radical del cultivo se limita al suelo superficial, de manera que la planta extrae agua fundamentalmente de los primeros centímetros del suelo (Villafañe, 1998). A este respecto, Vargas (2015) sugirió que la amplitud en los *PIR* para la etapa inicial de los cultivos, puede estar relacionado principalmente con el valor de *Kc* (0,5) utilizado, al proponer un valor superior de entre 0,7 y 0,8 para originar *PIR* adecuados a la realidad existente.

IV.3.4.- Inferencia sobre mejoras en las propiedades hidráulicas del suelo por adición de MO

Los valores medidos y simulados del contenido de *MO* para valores de *Ce* fijos (promedio para cada lote), al igual que los valores calculados de las *Pro Hid* del suelo para cada lote, son presentados en las tablas 15, 16 y 17. En general, para cada clase textural (de cada lote) se

esperaría una tendencia de incremento en las propiedades hidráulicas de los suelos, con el aumento del contenido de *MO*, ya que el aumento de ésta normalmente produce suelos con mayor capacidad de retención de agua y conductividad hidráulica, en gran parte como resultado de su influencia en la agregación del suelo y la distribución del espacio poroso asociado (Saxton y Rawls, 2006). De tal modo, que los valores estimados prevén la cuantificación en las mejoras de las propiedades hidráulicas del suelo, por unidad del contenido de *MO* incrementado.

Tabla 15.- Variación del contenido de *MO* y propiedades hidráulicas; lote Ayacucho

MO	CE (dS m⁻¹)	PMP (% Vol)	CC (% Vol)	Sat. (% Vol)	AD (cm cm⁻¹)	Cod. Hid. Sat. (mm h⁻¹)
1,00**	0,37	20,20	35,30	45,90	0,15	3,22
2,00**	0,37	20,50	35,80	47,90	0,15	4,68
3,00**	0,37	20,80	36,30	49,90	0,15	6,52
3,03*	0,37	20,67	35,77	50,23	0,15	8,14
4,00**	0,37	21,20	36,80	51,90	0,16	8,77
5,00**	0,37	21,50	37,40	54,00	0,16	11,48
6,00**	0,37	21,80	37,90	56,00	0,16	14,67
7,00**	0,37	22,10	38,40	58,00	0,16	18,39

Nota: Clase textural = FA. * = Contenido promedio de *MO* en el lote. ** = Contenido simulado de *MO* en el lote.

En el caso del *AD* se podría esperar incrementos ligeros desde 0,15 a 0,16cm cm⁻¹ y desde 0,16 a 0,18cm cm⁻¹ para los lotes Ayacucho y Zulia, respectivamente, mientras que para el lote Junin, el modelo *SPAW* predice un valor constante de 0,14 cm cm⁻¹. Esto se debe a la relativa equidad esperada entre los incrementos en los valores de *PMP* y *CC*, a pesar de que la estructura adicional y la porosidad inducidas por el incremento de la *MO*, deben influir en mayor medida en el agua retenida a *CC* (33kpa), aunque con una influencia mucho menor en el *PMP* (1500kpa), no obstante, se infiere que incrementos del contenido de *MO*, deben influir en la capacidad de agua disponible de la planta (*PMP - CC*) (Saxton y Rawls, 2006).

Si bien los datos de Hudson (xxxx) citado por (Saxton y Rawls, 2006) mostraron relaciones ligeramente diferentes para varias texturas del suelo, todas mostraron una fuerte relación de mayor capacidad de agua disponible con *MO* como resultado de una respuesta más fuerte en el rango húmedo que en el rango seco de la curva característica de humedad.

Tabla 16.- Variación del contenido de MO y propiedades hidráulicas del suelo; lote Junin

MO	CE (dS m ⁻¹)	PMP (% Vol)	CC (% Vol)	Sat. (% Vol)	AD (cm cm ⁻¹)	Cod. Hid. Sat. (mm h ⁻¹)
1,00**	0,56	26,20	40,60	50,10	0,14	2,14
2,00**	0,56	26,30	40,60	51,40	0,14	3,12
3,00**	0,56	26,40	40,60	52,70	0,14	4,36
4,00**	0,56	26,50	40,50	54,00	0,14	5,88
4,06*	0,56	26,18	39,76	54,20	0,14	7,35
5,00**	0,56	26,60	40,50	55,30	0,14	7,71
6,00**	0,56	26,70	40,50	56,60	0,14	9,87
7,00**	0,56	26,80	40,40	57,90	0,14	12,39

Nota: Clase textural = AL. * = Contenido promedio de MO en el lote. ** = Contenido simulado de MO en el lote.

Tabla 17.- Variación del contenido de MO y propiedades hidráulicas del suelo; lote Zulia

MO	CE (dS m ⁻¹)	PMP (% Vol)	CC (% Vol)	Sat. (% Vol)	AD (cm cm ⁻¹)	Cod. Hid. Sat. (mm h ⁻¹)
1,00**	0,27	19,60	36,10	46,70	0,16	3,34
2,00**	0,27	19,90	36,60	49,00	0,17	5,17
3,00**	0,27	20,20	37,10	51,30	0,17	7,54
3,43*	0,27	20,42	37,23	52,32	0,17	9,20
4,00**	0,27	20,50	37,60	53,50	0,17	10,53
5,00**	0,27	20,80	38,10	55,80	0,17	14,20
6,00**	0,27	21,10	38,60	58,10	0,17	18,60
7,00**	0,27	21,40	39,10	60,30	0,18	23,81

Nota: Clase textural = FAL. * = Contenido promedio de MO en el lote. ** = Contenido simulado de MO en el lote

Los contenidos de arcilla promedio para cada lote podrían influir en la variación de las propiedades hidráulicas del suelo, sobretodo en los contenidos de agua a *PMP* y *CC*, debido a que el contenido de agua a altas tensiones (1500 kPa) y niveles más húmedos (<100 kPa), están gobernados en gran medida por la textura (particularmente con la arcilla), por lo que la influencia de la agregación y la *MO* es mínima. No obstante, los efectos del contenido de *MO* son similares a los de la arcilla, por lo que aquellas texturas con alto contenido de arcilla pueden enmascarar los efectos del aumento de *MO* (Saxton y Rawls, 2006).

Por otra parte, los incrementos porcentuales en las *Pro Hid* del suelo esperadas por unidad de incremento de la *MO* son presentados en la tabla 18. Para todos los casos, el modelo *SPAW* predice que el porcentaje de incremento de las propiedades hidráulicas del suelo, disminuye gradualmente en la medida en que aumenta el contenido de *MO*. En función de estos resultados, se puede esperar un incremento porcentual promedio de las *Pro Hid* del suelo en 1,51%, 1,41% y 3,98% para las variables *PMP*, *CC* y *Sat*, respectivamente, del lote Ayacucho

y de 1,48%, 1,34% y 4,35% para las mismas variables en el lote Zulia, lo cual coincide con un aumento del 1,5 y 3,2% en el volumen del contenido de humedad a 1500 y 10kPa para *PMP* y contenido de humedad cercano a saturación, respectivamente, por cada incremento de unidad porcentual del contenido de *MO* reportados por Saxton *et all.* (1986). Esto se debe, a que la *MO* afecta las características de retención de agua del suelo, ya que su incremento produce una mayor agregación en la mayoría de los suelos agrícolas (Saxton y Rawls, 2006).

Tabla 18.- Incremento (%) en las propiedades hidráulicas por unidad de incremento de *MO*

ΔMO	Lote Ayacucho			Lote Junin			Lote Zulia		
	ΔPMP	ΔCC	$\Delta Sat.$	ΔPMP	ΔCC	$\Delta Sat.$	ΔPMP	ΔCC	$\Delta Sat.$
+1	1,49	1,42	4,36	0,38	0,00	2,59	1,53	1,39	4,93
+1	1,46	1,40	4,18	0,38	0,00	2,53	1,51	1,37	4,69
+1	1,92	1,38	4,01	0,38	-0,25	2,47	1,49	1,35	4,29
+1	1,42	1,63	4,05	0,38	0,00	2,41	1,46	1,33	4,30
+1	1,40	1,34	3,70	0,38	0,00	2,35	1,44	1,31	4,12
+1	1,38	1,32	3,57	0,37	-0,25	2,30	1,42	1,30	3,79
Promedios	1,51	1,41	3,98	0,38	-0,08	2,44	1,48	1,34	4,35

Nota: Todos los valores expresados en porcentaje

No obstante, la variación porcentual esperada de las propiedades hidráulicas del suelo para el lote Junin se reduce a 0,38%, -0,08% y 2,44% respectivamente, para las variables *PMP*, *CC* y *Sat*, pese a que el aumento de la agregación del suelo resultante del aumento de *MO* afectaría en mayor medida a la *CC* que al *PMP* (Saxton y Rawls, 2006). Esto se debe probablemente al efecto de la *Ce* al afectar el potencial osmótico (Ψ_o), ya que a medida que el agua del suelo se reduce, el componente químico del suelo generalmente permanecerá constante, provocando un aumento lineal en su concentración y el Ψ_o , aunque este proceso puede modificarse por interacciones químicas como la formación de precipitados o enlaces (Saxton y Rawls, 2006).

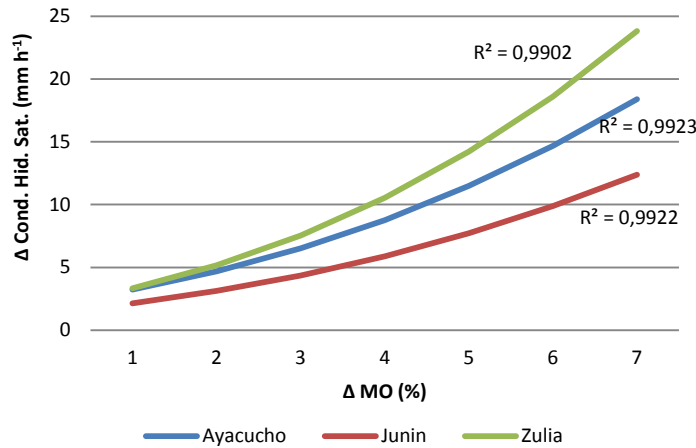


Figura 8.- Incremento esperado de la K_0

Finalmente, en la figura 8 se ilustran las curvas del incremento esperado de la K_0 para los lotes Ayacucho, Junin y Zulia. En todos los casos, las curvas de incremento exhiben una tendencia *Exponencial* con un coeficiente de determinación (R^2) igual o superior a 0.99. Si bien, este valor sólo refleja la bondad del ajuste del modelo utilizado por el programa SPAW a la variable que se pretender explicar (Negrín, 1982), el efecto de la MO sobre la conductividad se deriva fácilmente de los cambios en los contenidos de humedad del rango húmedo señalados anteriormente, ya que tanto la K_0 , como la conductividad hidráulica no saturada dependen de el contenido de humedad a saturación (0 kPa) y de la pendiente de la curva logarítmica de tensión-humedad señalados por Saxton y Rawls (2006).

No obstante, los perfiles de suelos frecuentemente exhiben diferencias tanto en el sentido vertical como en el sentido horizontal (presentan cierto grado de anisotropía), lo cual se manifiesta como diferencias en la permeabilidad entre la superficie y la subsuperficie. Los mayores cambios en las propiedades hidráulicas ocurren en los límites donde se presentan discontinuidades físicas, tales como límites de horizontes pedogenéticos contrastantes o capas compactadas derivadas del mal manejo de los suelos (Barrios y Florentino, 2008).

CONCLUSIONES

La presente propuesta exhibe una marcada viabilidad técnica y operativa para la modelación y uso de las variables hidráulicas del suelo, no obstante, la misma debe ser validada en escenarios reales ajustados a las condiciones locales.

La modelación de procesos de las relaciones suelo-agua-planta en la gestión del recurso hídrico del suelo y manejo de cultivos mediante modelos informáticos, es un procedimiento o método general válido para resolver problemas relacionados con estos, que si bien posee un valor útil y representa en la actualidad una oportunidad el análisis de procesos, también posee sus ventajas y desventajas.

La información básica requerida para la modelación y uso de las *Pro Hiddel* suelo, así como la información complementaria para coadyuvar su análisis, presentan una relativa facilidad de acceso, en comparación con las dificultades operativas y económicas que suponen las mediciones en campo o laboratorio.

El programa *SPA* limita los análisis a aquellos suelos cuyos valores sean inferiores al 8 y 60% del contenido de MO y del contenido de arcilla, respectivamente, además de los suelos con un valor de Dade entre 1,0 y 1,8 Mg (m³)⁻¹.

La obtención modelada de las variables hidráulicas del suelo permite hacer análisis y planeación de orden operativo; como la cuantificación de balance hídrico edáfico y la demanda de agua de un sistema de riego, el conocer los indicadores del momento óptimo de la labranza y la programación del riego, además de los de orden predictivo; como la inferencia en las mejoras del suelo dado algún manejo propuesto, así como los riesgos de compactación del suelo por manejo inadecuado de la humedad del mismo.

El empleo de funciones de pedo-transferencia resultan ser muy útiles al momento de mostrar tendencias en el comportamiento del agua en el suelo, sin embargo éstas deben ser tratadas con mucha precaución cuando se usa con fines de predicción para suelos particulares.

El uso de las variables hidráulicas del suelo en la gestión hídrica del mismo y el manejo de cultivos, se perfila como una opción para técnicos y productores, dado la facilidad de uso y su relativo bajo costo.

La ausencia de datos medidos de compactación *in situ* podría generar variabilidad general en los resultados de la modelación de las Pro Hid del suelo por parte del modelo *SPAW*, lo cual puede tener implicaciones en su posterior utilización para la gestión hídrica de los cultivos.

RECOMENDACIONES

El empleo de los modelos de simulación informática en la gestión hídrica del suelo y los cultivos exige conocimiento de los mismos para evitar incurrir en errores de predicción, por lo tanto, se sugiere el estudio y entendimiento de sus componentes, alcances y limitaciones antes de ser operados.

En la práctica, es necesario incluir datos de compactación de suelo ya que éste parámetro influye en las predicciones de las propiedades hidráulicas del suelo simuladas por el modelo *SPAW*.

Se requiere el impulso o promoción de investigaciones locales para validar el uso del modelo *SPAW* y desarrollar funciones de pedo-transferencia adecuadas a escenarios reales ajustados a las condiciones locales que permitan reflejar tendencias de comportamiento de las variables edáficas de interés.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Andrade, O., Arrieche, I., & León, M. (2014). Diagnóstico de la fertilidad de suelos agrícolas del estado Yaracuy basado en análisis de laboratorio. *Revista Venesuelos*, 22, 5-15.

Aoki, A., & Sereno, R. (2005). Comparación de metodologías de cálculo de propiedades hidráulicas de un suelo a partir de datos medidos con infiltrómetro de disco. *Revista Agricultura Técnica*, 65 (2), 204-209.

Arrieche, I., Ruíz, M., Carrillo, C., León, M., Aular, L., Mora, R., y otros. (2014). Unificación de criterios para la determinación de la materia orgánica del suelo. Estudio interlaboratorio. *Revista Venesuelos*, 21, 33-42.

Arteaga, R., Ángeles, V., & Vázquez, M. 2. (2011). Programa CropWat para planeación y manejo del recurso hídrico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2 (2), 179-195.

Arteaga, R., Ángeles, V., & Vázquez, M. (2011). Programa CropWat para planeación y manejo del recurso hídrico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2 (2), 179-195.

Barrios, R., & Florentino, A. (2008). Propiedades hidráulicas de dos suelos subirrigados cultivados con Palmaaceitera en el estado Monagas, Venezuela. *Revista Agronomía Tropical*, 58 (2).

Bravo, S. (2000). *Aspectos básicos de química de suelos*. Barinas, Venezuela: Colección Ciencia y Tecnología, Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora.

Cadena, M., Cantú, M., Campos, S., & Ríos, M. (2010). Modelo para estimar un límite superior dabilidad del suelo en función de su textura y concentración de materia orgánica. *Revista Terra Latinoamericana*, 28 (4), 297-305.

Claro, F. (1991). *Balance hídrico*. Instituto colombiano de hidrología, meteorología y adecuación de tierras (HIMAT), Santa fe de Bogotá. Pp. 34.

Copa, R. (2014). *Propiedades hidrofísicas y químicas del suelo para el mejoramiento del sistema de riego y su uso sostenible*. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, Unidad de Postgrado, Maestría en Ingeniería de Riego, La Paz, Bolivia.

Degioanni, A., Cisneros, J., Cantero, A., & Videla, H. (2006). Modelo de simulación del balance hídrico en suelos con freática poco profunda. *Revista Ciencia del Suelo*, 24 (1), 29-38.

Dexter, A., Czyz, E., Birkás, M., Díaz, E., Dumitru, E., Enache, R., y otros. (2005). SIDASS project Part 3. The optimum and the range of water content for tillage – further developments. *Journal Soil & Tillage Research*, 82, 29-37.

Feike, L., William, A., Martinus, v. G., & Williams, J. (1986). The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database User's Manual Version 1.0. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati: Ohio 45268.

Filgueira, R., Soracco, C., Sarli, G., & Fournier, L. (2006). Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. *Revista Ciencia del Suelo*, 24 (1).

García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Revista Pastos y Forrajes*, 35 (2), 125-138.

González, W. (2016). La modelación como competencia en la formación del profesional informático. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 10 (2), 59-71.

Grassi, C. J. (1998). *Formulación de proyectos de riego y drenaje* (1 ed.). Mérida: Talleres gráficos del CIDIAT.

INTAGRI. (2017). Propiedades Físicas del Suelo y el Crecimiento de las Plantas. *Serie Suelos. Artículos Técnicos de INTAGRI. México*. (29), 5 p.

Julca, A., Meneses, L., Blas, R., & Bello, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Revista Idesia*, 24 (1), 49-61.

Lozano, J., Madero, E., Tafur, H., Herrera, O., & Amézquita, E. (2005). La conductividad hidráulica del suelo estudiada en el Valle del Cauca con el nuevo indicador del USDA. *Revista Acta Agronómica*, 54 (3).

Lozano, Z., Aliendres, Y., Bravo, C., Rodríguez, G., Delgado, M., & Caballero, R. (2015). Influencia de manejo sobre la calidad de la materia orgánica de dos suelos bajo horticultura. *Revista Venesuelos*, 23, 19-32.

Matus, F., & Maire, C. (2000). Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Revista Agricultura Técnica*, 60 (2).

Morles, V. (2002). Sobre la metodología como ciencia y el método científico: un espacio polémico. *Revista de Pedagogía*, 23 (66), 121-146.

Narváez, H., Combatt, E., & Bustamante, I. (2014). Distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia de la desembocadura del río Sinú (Córdoba, Colombia). *Narváez, H.; Combatt, E.; Bustamante, I. 2014. Distribución espacial de la salinidad en suelos dRevista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17 (2), 433-443.

Negrín, A. (1982). *Iniciación a la estadística*. Editorial José Martí. Caracas, Venezuela.

- Pardo, J., & Proaño, J. (2008). Programación del riego mediante el balance hídrico en una plantación de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el Cantón Marcelino Maridueña provincia de Guayas. In *XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Universidad Agraria del Ecuador. [Documento en línea]. En; <http://sites.google.com/site/uaeproyectosdeinvestigacion/coupons>. [Consulta: Julio, 09 de 2010].*
- Peralta, R., & Calle, B. (2017). Evaluación de recursos hídricos con fines de riego en la microcuenca Keraya, municipio de Cairoma. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 4 (2), 20-29.
- Pérez, M., & Florentino, A. (2014). Indicadores de la labranza basados en la curva de retención de la humedad del suelo. *Revista Venesuelos*, 22, 17-29.
- Pérez, M., & Florentino, A. (2013). Intervalo de agua menos limitante en función de propiedades del suelo. *Revista Venesuelos*, 21, 43-60.
- Ramírez, B., González, A., Valdivia, R., Salas, José, & García, J. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10 (3), 539-550.
- Reyes, W. (2010). Evaluación de la susceptibilidad a la compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola en Venezuela. *Revista Bioagro*, 22 (1), 29-36.
- Richards, L. (1954). *Diagnosis and improvement of sa-line and alkali soils. Washintong: USSL (Vol. Agriculture Handbook No. 60 U. S.). Dept. Agric., Supt. Documents, U. S. Government Printing Office Washington 25, D. C.*
- Sanchez, B., Ruiz, M., & Rios, M. (2005). Sanchez, B. Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua. *Revista Agronomía Tropical*, 55 (4), 507-534.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions.
- Saxton, K., Rawls, W., Romberger, J. S., & Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Trans. Amer. Soc. Agri. Engr.*, 50 (4), 1031-1035.
- Saxton, K., Willey, P., & Rawls, W. (2006). *The SPAW Model for Agricultural Field and Pond Hydrologic Simulation*. (Editors, & C. Press, Edits.) Chapter 17 in: *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*, V. P. Singh and D. Frevert. 401-435.
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo*. Roma: Boletín de suelos de la FAO, número 79. Servicio de Manejo de las Tierras y de la Nutrición de Plantas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar? *Revista BIOAGRO*, 20 (2), 89-95.
- Trujillo, M., Méndez, J., Hossne, A., & Parra, F. (2016). Efecto del contenido de humedad y nivel de compactación de un suelo Ultisol sobre algunas características bromatológicas del cultivo de soya (*Glycine max* L. Merrill cv San Baiba). *Revista Saber*, 28 (4), 706-712.
- Vargas, J. G. (2015). *Validación del modelo CropWat en suelo Inceptisol bajo cultivo comercial de caña de azúcar (Saccharum officinarum)*. Requisito parcial para optar al grado de Magister Scientiarum, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora, Vicerectorado de Producción Agrícola, Maestría en Recursos Naturales Renovables, mención Manejo de los Recursos Agua y Suelo, Guanare, Portuguesa.
- Villafañe, R. (1998). *Diseño Agronómico del Riego*. Maracay: Fundación Polar y Departamento de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela.
- Zafra, O. (2006). Tipos de Investigación. *Revista Científica General José María Córdova*, 4 (4), 13-14.
- Zavala, M., Saucedo, H., & Fuentes, C. (2018). Modelos analíticos fractales para las propiedades hidráulicas de suelos no saturados. *Revista Agrociencia*, 52, 1059-1070.

ANEXOS

Anexo A.- Histórico de precipitaciones; provisto por Agroinversiones Orión

N ^a	AÑOS	ene	feb	mar	apr	may	jun	jul	aug	sep	oct	nov	dec	total
1	1979	0	0	71	141	388	169	185	178	64	174	130	100	1.600
2	1980	0	0	24	175	435	302	417	262	151	135	96	11	2.008
3	1981	0	0	30	294	408	267	126	240	137	102	34	65	1.701
4	1982	10	0	0	203	342	164	310	184	92	108	162	30	1.605
5	1983	0	0	0	52	406	262	286	162	161	260	23	31	1.641
6	1984	9	26	0	78	71	278	241	185	156	122	62	15	1.242
7	1985	0	0	0	3	175	236	141	212	244	112	0	38	1.161
8	1986	1	5	2	97	207	248	317	121	200	229	93	10	1.530
9	1987	0	0	55	89	34	142	308	272	159	121	88	5	1.272
10	1988	0	0	0	39	63	369	180	213	258	168	105	15	1.410
11	1989	0	66	0	16	290	210	198	142	150	157	65	3	1.297
12	1990	1	10	22	129	303	303	255	136	187	180	125	10	1.660
13	1991	1	0	38	68	79	291	277	79	309	175	135	11	1.462
14	1992	0	0	0	158	83	227	335	270	197	78	176	14	1.539
15	1993	3	0	39	296	214	338	215	399	111	68	86	15	1.783
16	1994	0	2	58	87	79	246	274	124	193	166	122	18	1.368
17	1995	5	0	4	33	74	133	333	81	71	190	38	24	985
18	1996	0	31	0	28	276	242	204	195	140	102	177	28	1.424
19	1997	0	34	1	30	232	370	335	186	137	173	3	9	1.510
20	1998	0	11	7	199	231	363	274	184	88	214	53	12	1.636
21	1999	2	30	55	272	105	143	184	394	191	119	79	14	1.587
22	2000	0	3	4	3	299	240	326	236	163	143	48	36	1.500
23	2001	0	2	1	56	265	194	167	220	148	90	37	125	1.307
24	2002	0	0	38	83	189	366	133	162	191	141	215	4	1.519
25	2003	0	0	0	148	287	420	256	287	223	120	32	18	1.789
26	2004	0	0	2	77	366	358	313	381	121	242	55	0	1.914
27	2005	0	0	0	124	223	343	206	208	174	162	158	0	1.597
28	2006	103	0	13	56	174	343	211	206	172	0	0	0	1.277
29	2007	1	0	52	28	74	60	259	153	99	153	88	0	967
30	2008	0	0	7	45	252	212	326	337	80	93	45	0	1.398
31	2009	43	46	30	44	73	298	253	170	103	87	28	22	1.198
32	2010	0	0	30	247	245	271	376	89	323	70	66	64	1.781
33	2011	58	14	40	121	285	235	339	305	235	341	116	44	2.133
34	2012	0	3	67	98	346	286	287	248	199	262	21	0	1.816
35	2013	0	0	36	187	224	367	227	227	56	158	20	32	1.532
36	2014	0	0	0	56	94	207	367	197	188	271	70	19	1.469
37	2015	11	54	1	73	71	302	252	314	45	168	142	29	1.462
38	2016	0	0	25	76	281	275	287	124	88	255	199	73	1.681
39	2017	14	0	123	87	289	279	331	194	146	137	30	4	1.635
40	2018	30	0	0	62	157	275	182	220	255	151	14	0	1.346
41	2019	0	0	0	35	67	230	201	251	97	169	3	3	1.054
42	2020	0	0	0	7	115	125	117	346	230	129	172	9	1.250
43	2021	40	8	38	124	303	132	209	172	163	131	85	0	1.405
Promedio		8	8	21	98	209	253	250	216	160	155	81	23	1.501
Prom. Acum.		8	16	36	135	343	596	846	1.063	1.223	1.377	1.459	1.482	

**Anexo B.- Datos climáticos; localidad Guanare, Venezuela. (base de datos
ClimWat 2.0)**

Mes	Temp Mín (°C)*	Temp Max (°C)*	Humedad (%)*	Viento (m/s)*	Insolación (horas)*	Rad (MJ/m ² /día)**	Éto (mm/día)**
Enero	20.2	33.1	70	2.0	5.7	16.2	4.17
Febrero	21.3	33.8	69	2.3	5.5	16.8	4.59
Marzo	22.6	34.2	69	2.3	4.9	16.8	4.73
Abril	23.1	32.7	84	2.1	3.5	14.9	3.68
Mayo	22.6	31.0	88	1.9	4.0	15.4	3.44
Junio	21.9	30.1	84	1.8	4.5	15.7	3.52
Julio	21.4	30.0	82	1.7	5.1	16.7	3.68
Agosto	21.6	30.6	78	1.7	5.6	17.9	4.02
Septiembre	21.9	31.3	81	1.7	5.5	17.7	3.96
Octubre	21.9	31.5	80	1.7	5.3	16.7	3.82
Noviembre	21.7	31.8	77	1.7	5.3	15.7	3.71
Diciembre	20.4	32.0	72	1.8	5.4	15.3	3.79
Promedio	21.7	31.8	78	1.9	5.0	16.3	3.93

Nota: * = Reportados en la base de datos *ClimWat 2.0* para la localidad seleccionada

** = Calculado por el programa *CropWat 8.0*

Anexo C.- Propiedades físicas de los suelos (*Lab-UNELLEZ*)

Muestra	Lote	Arena	Arcilla	Limo	Salinidad	MO	Clase Textural
1	Ayacucho	17	36	47	0,5	3,4	Franco Arcillo Limoso
2	Ayacucho	39	24	37	0,2	3,1	Franco
3	Ayacucho	11	38	51	0,4	2,6	Franco Arcillo Limoso
4	Junin	25	30	45	0,4	3,7	Franco Arcilloso
5	Junin	17	34	49	0,5	3,8	Franco Arcillo Limoso
6	Junin	1	50	49	0,7	4,3	Arcillo Limoso
7	Junin	3	56	41	0,6	4,2	Arcillo Limoso
8	Junin	7	48	45	0,6	4,3	Arcillo Limoso
9	Zulia	15	36	49	0,2	3,3	Franco Arcillo Limoso
10	Zulia	5	42	53	0,3	4,3	Arcillo Limoso
11	Zulia	13	36	51	0,3	2,9	Franco Arcillo Limoso
12	Zulia	7	24	69	0,2	3,5	Franco Limoso
13	Zulia	17	30	53	0,3	3,4	Franco Arcillo Limoso
14	Zulia	25	26	49	0,3	3,2	Franco

Anexo D.- Requerimiento hídrico del cultivo; lote Ayacucho

Mes	Decada	Etapa	Kc (coef)	Etc (mm/día)	Etc (mm/dec)	Prec, Efec (mm/dec)	Req, Riego (mm/dec)	Req, Riego (mm/mes)
Sep	2	Inic	0,5	2,0	15,8	31,0	0,0	
Sep	3	Inic	0,5	2,0	19,6	38,8	0,0	0,0
Oct	1	Inic	0,5	1,9	19,3	40,5	0,0	
Oct	2	Inic	0,5	1,9	19,1	40,9	0,0	0,0
Oct	3	Inic	0,5	1,9	20,8	35,1	0,0	
Nov	1	Inic	0,5	1,9	18,7	28,7	0,0	
Nov	2	Des	0,6	2,1	20,6	23,6	0,0	7,0
Nov	3	Des	0,7	2,5	25,2	18,2	7,0	
Dic	1	Des	0,8	3,0	29,9	11,7	18,2	
Dic	2	Des	0,9	3,5	34,6	5,8	28,9	87,1
Dic	3	Des	1,0	4,1	44,8	4,7	40,0	
Ene	1	Des	1,2	4,7	47,1	3,8	43,3	
Ene	2	Med	1,2	5,1	50,8	2,0	48,8	147,7
Ene	3	Med	1,2	5,3	57,8	2,2	55,6	
Feb	1	Med	1,2	5,4	54,2	2,3	52,0	
Feb	2	Med	1,2	5,6	55,9	2,1	53,9	147,5
Feb	3	Med	1,2	5,7	45,2	3,6	41,6	
Mar	1	Med	1,2	5,8	57,9	3,8	54,1	
Mar	2	Med	1,2	5,9	58,8	4,4	54,5	155,9
Mar	3	Med	1,2	5,4	59,6	12,2	47,3	
Abr	1	Med	1,2	4,9	49,1	21,2	27,9	
Abr	2	Med	1,2	4,5	44,8	28,4	16,5	53,9
Abr	3	Med	1,2	4,4	43,9	34,4	9,5	
May	1	Med	1,2	4,3	42,9	41,6	1,3	
May	2	Med	1,2	4,2	42,0	48,4	0,0	1,3
May	3	Med	1,2	4,2	46,5	49,0	0,0	
Jun	1	Fin	1,2	4,3	42,6	49,2	0,0	
Jun	2	Fin	1,2	4,2	41,5	50,6	0,0	0,0
Jun	3	Fin	1,1	4,0	40,0	50,4	0,0	
Jul	1	Fin	1,1	3,8	38,3	50,3	0,0	
Jul	2	Fin	1,0	3,7	36,7	50,3	0,0	0,0
Jul	3	Fin	0,9	3,5	38,9	49,3	0,0	
Ago	1	Fin	0,9	3,4	33,9	48,5	0,0	
Ago	2	Fin	0,8	3,3	32,5	47,7	0,0	0,0
Ago	3	Fin	0,7	3,0	32,7	45,0	0,0	
Sep	1	Fin	0,7	2,7	19,2	29,1	0,0	0,0
Totales					1381,2	1008,5	600,3	600,3

Anexo E.- Requerimiento hídrico del cultivo; lote Junin

Mes	Decada	Etapa	Kc (coef)	Etc (mm/día)	Etc (mm/dec)	Prec, Efec (mm/dec)	Req, Riego (mm/dec)	Req, Riego (mm/mes)
Oct	2	Inic	0,5	1,9	15,3	32,7	0,0	
Oct	3	Inic	0,5	1,9	20,8	35,1	0,0	0,0
Nov	1	Inic	0,5	1,9	18,7	28,7	0,0	
Nov	2	Inic	0,5	1,9	18,6	23,6	0,0	0,5
Nov	3	Inic	0,5	1,9	18,7	18,2	0,5	
Dic	1	Inic	0,5	1,9	18,8	11,7	7,1	
Dic	2	Des	0,6	2,1	21,0	5,8	15,2	46,7
Dic	3	Des	0,7	2,7	29,2	4,7	24,4	
Ene	1	Des	0,8	3,2	32,4	3,8	28,6	
Ene	2	Des	0,9	3,8	38,3	2,0	36,3	112,1
Ene	3	Des	1,0	4,5	49,4	2,2	47,2	
Feb	1	Med	1,2	5,2	51,8	2,3	49,6	
Feb	2	Med	1,2	5,5	55,4	2,1	53,3	144,0
Feb	3	Med	1,2	5,6	44,8	3,6	41,1	
Mar	1	Med	1,2	5,7	57,3	3,8	53,5	
Mar	2	Med	1,2	5,8	58,3	4,4	53,9	154,2
Mar	3	Med	1,2	5,4	59,0	12,2	46,8	
Abr	1	Med	1,2	4,9	48,6	21,2	27,5	
Abr	2	Med	1,2	4,4	44,4	28,4	16,1	52,7
Abr	3	Med	1,2	4,4	43,5	34,4	9,1	
May	1	Med	1,2	4,3	42,5	41,6	0,9	
May	2	Med	1,2	4,2	41,6	48,4	0,0	0,9
May	3	Med	1,2	4,2	46,1	49,0	0,0	
Jun	1	Med	1,2	4,2	42,2	49,2	0,0	
Jun	2	Med	1,2	4,3	42,5	50,6	0,0	0,0
Jun	3	Med	1,2	4,3	43,2	50,4	0,0	
Jul	1	Fin	1,2	4,4	43,8	50,3	0,0	
Jul	2	Fin	1,2	4,3	43,0	50,3	0,0	0,0
Jul	3	Fin	1,1	4,2	46,2	49,3	0,0	
Ago	1	Fin	1,1	4,1	40,9	48,5	0,0	
Ago	2	Fin	1,0	4,0	39,7	47,7	0,0	0,0
Ago	3	Fin	0,9	3,7	40,7	45,0	0,0	
Sep	1	Fin	0,9	3,4	34,4	41,6	0,0	
Sep	2	Fin	0,8	3,2	31,8	38,8	0,0	0,0
Sep	3	Fin	0,8	2,9	29,2	38,8	0,0	
Oct	1	Fin	0,7	2,7	18,8	28,3	0,0	0,0
Totales					1370,8	1008,4	511,2	511,2

Anexo F.- Requerimiento hídrico del cultivo; lote Zulia

Mes	Decada	Etapa	Kc (coef)	Etc (mm/día)	Etc (mm/dec)	Prec, Efec (mm/dec)	Req, Riego (mm/dec)	Req, Riego (mm/mes)
Nov	2	Inic	0,5	1,9	14,9	18,8	0,0	
Nov	3	Inic	0,5	1,9	18,7	18,2	0,5	0,5
Dic	1	Inic	0,5	1,9	18,8	11,7	7,1	
Dic	2	Inic	0,5	1,9	19,0	5,8	13,2	37,1
Dic	3	Inic	0,5	2,0	21,5	4,7	16,8	
Ene	1	Inic	0,5	2,0	20,2	3,8	16,4	
Ene	2	Des	0,6	2,3	23,0	2,0	21,0	67,1
Ene	3	Des	0,7	2,9	31,9	2,2	29,7	
Feb	1	Des	0,8	3,5	35,4	2,3	33,1	
Feb	2	Des	0,9	4,2	41,8	2,1	39,7	106,8
Feb	3	Des	1,0	4,7	37,6	3,6	34,0	
Mar	1	Des	1,1	5,3	53,1	3,8	49,4	
Mar	2	Med	1,2	5,8	57,6	4,4	53,2	148,7
Mar	3	Med	1,2	5,3	58,4	12,2	46,1	
Abr	1	Med	1,2	4,8	48,1	21,2	27,0	
Abr	2	Med	1,2	4,4	43,9	28,4	15,6	51,2
Abr	3	Med	1,2	4,3	43,0	34,4	8,6	
May	1	Med	1,2	4,2	42,1	41,6	0,4	
May	2	Med	1,2	4,1	41,1	48,4	0,0	0,4
May	3	Med	1,2	4,1	45,6	49,0	0,0	
Jun	1	Med	1,2	4,2	41,8	49,2	0,0	
Jun	2	Med	1,2	4,2	42,1	50,6	0,0	0,0
Jun	3	Med	1,2	4,3	42,7	50,4	0,0	
Jul	1	Med	1,2	4,3	43,3	50,3	0,0	
Jul	2	Med	1,2	4,4	44,0	50,3	0,0	0,6
Jul	3	Med	1,2	4,5	49,9	49,3	0,6	
Ago	1	Fin	1,2	4,7	46,7	48,5	0,0	
Ago	2	Fin	1,2	4,7	46,6	47,7	0,0	3,3
Ago	3	Fin	1,1	4,4	48,3	45,0	3,3	
Sep	1	Fin	1,0	4,1	41,3	41,6	0,0	
Sep	2	Fin	1,0	3,9	38,8	38,8	0,1	0,1
Sep	3	Fin	0,9	3,6	36,2	38,8	0,0	
Oct	1	Fin	0,9	3,4	33,5	40,5	0,0	
Oct	2	Fin	0,8	3,1	31,0	40,9	0,0	0,0
Oct	3	Fin	0,8	2,8	31,2	35,1	0,0	
Nov	1	Fin	0,7	2,6	18,3	20,1	0,0	0,0
Totales					1351,4	1015,5	416,0	416,0

